

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problems Mailbox.**

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 10-307001

(43)Date of publication of application : 17.11.1998

(51)Int.Cl.

G01B 7/00

G01B 21/20

H01L 41/08

(21)Application number : 09-179987

(71)Applicant : MATSUSHITA ELECTRIC IND CO LTD

(22)Date of filing : 04.07.1997

(72)Inventor : YAMAMOTO MASAKI

(30)Priority

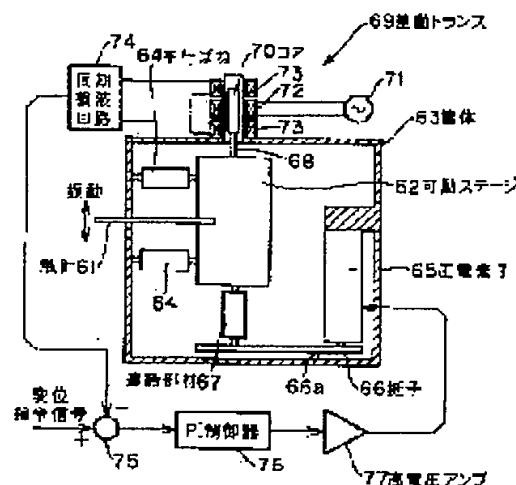
Priority number : 09 53684 Priority date : 07.03.1997 Priority country : JP

## (54) METHOD AND DEVICE FOR MEASURING FINE-SURFACE SHAPE

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To remove the factors for making measurement instable, to achieve the high speed in measurement furthermore and to remove the restriction, wherein the objects of measurement are conductors, in a fine-surface-shape measuring device used in the inner-surface measurement of a minute hole.

SOLUTION: In this constitution, the displacement of a piezo-electric element 65 is expanded by a lever 66 and transmitted to a tracer 61, and the displacement is measured by a differential transformer 69 at the same time. Thus, the measuring errors caused by the thermal deformation, drift and hysteresis of the piezo-electric element 65 can be removed. Furthermore, by utilizing the expanded large displacement region, the vibration center can be removed following the surface shape even for the objects to be measured having the large irregularity. The high measuring accuracy and the high speed of the measurement can be achieved at the same time without an auxiliary means. Furthermore, the shape of the object to be measured of a body to be conducted can be measured only by adding the tracer and a contact detecting circuit, wherein a piezo-electric thin film is formed in the device constitution.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-307001

(43) 公開日 平成10年(1998)11月17日

(51) Int.Cl. <sup>9</sup>	識別記号	F I	
G 0 1 B 7/00		G 0 1 B 7/00	D
21/20		21/20	P
H 0 1 L 41/08		H 0 1 L 41/08	Z

審査請求 未請求 請求項の数24 O L (全 23 頁)

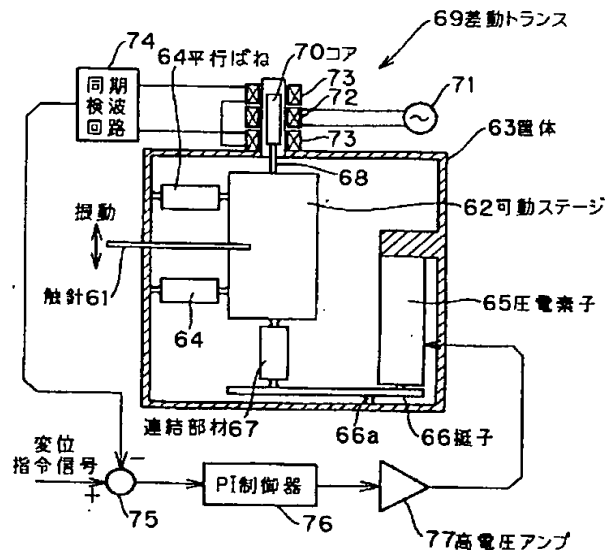
(21) 出願番号	特願平9-179987	(71) 出願人	000005821 松下電器産業株式会社 大阪府門真市大字門真1006番地
(22) 出願日	平成9年(1997)7月4日	(72) 発明者	山 本 正 樹 神奈川県川崎市多摩区東三田3丁目10番1号 松下技研株式会社内
(31) 優先権主張番号	特願平9-53684	(74) 代理人	弁理士 蔵合 正博
(32) 優先日	平9(1997)3月7日		
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 微細表面形状測定方法およびその装置

(57) 【要約】

【課題】 微小穴の内面計測などに用いられる微細表面形状測定装置において、計測を不安定にする要因を取り除き、さらに計測の高速化を行い、また測定対象物が導電体である制約を取り除くこと。

【解決手段】 圧電素子65の変位を梃子66で拡大して触針61に伝えるとともに差動トランス69により変位を測定しフィードバックをかける構成により、圧電素子65の熱変形、ドリフト、ヒステリシスに起因する計測誤差を無くすることができる。さらに、拡大された大変位領域を利用して、凹凸の大きな測定対象物に対しても振動中心を表面形状に追従して移動させることができ、補助移動手段なしで高い計測精度と計測の高速化を同時に達成することができる。また、装置構成に圧電薄膜を形成した触針と接触検出回路を追加するだけで、被導電体の測定対象物も形状計測を行うことができる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 触針を取り付けた微小変位が可能なアクチュエータの変位をモニタする変位センサを有し、この変位センサからの信号をもとにフィードバック制御により前記アクチュエータを駆動することを特徴とする微細表面形状測定方法。

【請求項 2】 微小変位が可能なアクチュエータに取り付けられた触針を位置決め位置を中心として微振動させ、その時の触針と測定対象面との接触を検出して、その接触時間の触針の振動周期に対する比率が常に一定となるように前記アクチュエータの位置決め位置を調整し、この位置決め位置を記録しながら前記触針をある経路に沿って移動させることにより測定対象面の凹凸形状を求めることを特徴とする微細表面形状測定方法。

【請求項 3】 触針を取り付けた微小変位が可能なアクチュエータの変位をモニタする変位センサを有し、この変位センサからの信号をもとにフィードバック制御により前記アクチュエータを駆動するとともに、前記微小変位が可能なアクチュエータに取り付けられた触針を位置決め位置を中心として微振動させ、その時の触針と測定対象面との接触を検出して、その接触時間の触針の振動周期に対する比率が常に一定となるように前記アクチュエータの位置決め位置を調整し、この位置決め位置を記録しながら前記触針をある経路に沿って移動させることにより測定対象面の凹凸形状を求めることを特徴とする微細表面形状測定方法。

【請求項 4】 触針を振動させるためのアクチュエータとして圧電素子を使用するとともに、この圧電素子の変位をモニタする変位センサを備えた振動ヘッドと、前記振動ヘッドの圧電素子を駆動する駆動回路と、前記触針と測定対象面との接触を電気的導通により検出する導通検出回路と、前記振動ヘッドの変位センサからの信号および導通検出回路からの信号をもとに触針の振動中心と測定対象面の相対間隔が常に一定であるように前記駆動回路をフィードバック制御する手段とを備えた微細表面形状測定装置。

【請求項 5】 振動ヘッドの圧電素子として、曲げモードで変形する圧電素子単体または積層圧電素子と変形拡大機構の組み合わせを用いることを特徴とする請求項 4 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 6】 振動ヘッドが、触針を保持する触針ホルダーと、前記触針ホルダーに固定されて前記触針ホルダーを変位させる円筒型 PZT 素子と、前記円筒型 PZT 素子を一定の位置に固定する固定板と、前記固定板に設けられた発光素子と、前記発光素子からの光を通過させる微小孔を有するピンホールプレートと、前記微小孔を通過した光を受光する受光素子とを備えた請求項 4 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 7】 発光素子が発光ダイオードであり、受光素子が 4 分割ホトダイオードである請求項 6 記載の微細

表面形状測定装置。

【請求項 8】 導通検出回路が、微弱な交流電圧を発生する交流電源と、触針と測定対象面との接触による短絡電流を検出する手段と、触針までのリードと測定対象面との間に発生する浮遊容量を防止するために前記リードに設けられたガードシールドとを備えた請求項 4 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 9】 導通検出回路が、触針と測定対象面との間に発生する浮遊容量を防止するために前記触針に設けられたガードシールドを備えた請求項 8 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 10】 触針を取り付けた微小変位が可能なアクチュエータと、前記アクチュエータを駆動する駆動手段と、前記アクチュエータの変位をモニタする変位センサと、前記変位センサからの信号をもとに前記アクチュエータをフィードバック制御するための信号を前記駆動手段へ送出する制御手段とを備えた微細表面形状測定装置。

【請求項 11】 前記アクチュエータが、圧電素子と変形拡大機構の組み合わせであり、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 12】 前記アクチュエータが、曲げモードで変位する圧電素子であり、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 13】 前記アクチュエータが、圧電素子と電磁モータにより駆動される位置決めステージの組み合わせであり、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 14】 前記電磁モータを位置決め制御しながら駆動する駆動手段と、前記変位センサからの信号をもとに前記電磁モータをフィードバック制御するための信号を前記駆動手段へ送出する制御手段とを備えた請求項 13 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 15】 前記アクチュエータが、ボイスコイル単体、あるいはボイスコイルと圧電素子の組み合わせであり、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 16】 触針と測定対象面の間に電圧を印加し、触針と測定対象面との接触を電気的導通により検出する導通検出手段を備えた請求項 10 から 15 のいずれかに記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 17】 触針の周囲に圧電体薄膜を形成して触針のたわみ量を電圧として検出することにより、触針と測定対象面との接触を検出する接触検出手段を備えた請求項 10 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 18】 前記圧電体薄膜を付着した触針のたわみ量の信号と所定の閾値とを比較し、触針たわみ信号が閾値を上回る時は触針が測定対象面に接触していると判

定し、下回る時は触針が測定対象面に接触していないと判定する信号処理装置を有することを特徴とする請求項 17 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 19】 前記圧電体薄膜を付着した触針のたわみ量の信号と前記アクチュエータの変位信号の統計的相関を順次計算し、両者に相関がある場合は触針が測定対象面に接触していると判定し、両者が無相関の場合は触針が測定対象面に接触していないと判定する信号処理装置を有することを特徴とする請求項 17 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 20】 前記接触検出手段の出力信号から触針の振動 1 周期に占める接触時間の割合を測定するデューティ計測手段と、このデューティ計測手段の出力信号から前記接触時間の触針の振動周期に対する比率が常に一定となるように前記アクチュエータの位置決め位置を調整する制御手段とを備えた請求項 16 または 17 に記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 21】 触針とそれを加振する前記アクチュエータを 360 度以上回転させる主軸と、測定対象を X Y Z の 3 自由度で位置決めする位置決めステージとを有することを特徴とする請求項 10 から 20 のいずれかに記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 22】 前記主軸の先端に取り付けられた前記アクチュエータからケーブルを外部に引き出すに際し、主軸と同時に同心円上を回転するケーブル固定部を有し、前記主軸からケーブル固定部までの間のケーブルが余裕をもって引き回されることにより、ケーブル曲げが変化することによる不必要な外力が前記主軸に加わるのを防止することを特徴とする請求項 21 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 23】 触針が測定対象の表面を検出しながら前記位置決めステージが移動するに際し、直前に検出された測定対象面を平面で近似し、その平面が直後に検出される測定対象面と同一であるという仮定を立て、この仮定にしたがって位置決めステージを移動し、主軸を回転することを特徴とする請求項 21 記載の微細表面形状測定装置。

【請求項 24】 顕微鏡を有し、前記位置決めステージ上の固定点と測定対象物上の測定点を顕微鏡画面内で位置認識することにより、測定対象上の測定点を触針の直下に持ってくるように位置決めステージを移動することを特徴とする請求項 21 記載の微細表面形状測定装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、マイクロマシン用部品の微細構造の形状計測や内燃機関の燃料噴射ノズルの内面形状測定といった、サブミリオードの 3 次元形状を測定するために用いられる表面形状測定技術に関するもので、特に、測定対象面に接触する触針を用いた接触式の表面形状測定技術に関する。

【0002】

【従来の技術】 従来、微小形状の接触式による測定方法は特開平 5-264214 号に記載されたものが知られている。図 33 に従来の微小表面形状測定装置の代表的な構造を示す。図中、1001 は触針であり、アクチュエータ 1002 は触針 1001 を一定位置で一定振幅で振動させる。触針 1001 と測定対象物 1003 との電気導通を直流電圧をかけて短絡電流を見ることで検出し、導通時間の振動周期に対する比率をデューティサイクル測定装置 1006 により検出する。図 34 に示すように、振動する触針がある変位  $s$  を越えると、触針と測定対象面の間で電氣的導通が確保される。このため、触針と測定対象面 1003 a との相対距離の変化とデューティサイクルは、図 35 のような関係を持っている。図 35 では両者の関係は完全に比例ではないが、触針 1001 の振動をサイン波から三角波に変更することにより比例の度合いを高めることが可能である。以上のことから、デューティサイクルをコンピュータ 1007 で処理し、プリンタ 1008 およびモニタ 1009 で確認しながら Z 軸送り機構 1005 を動作させてテーブル 1004 を移動させることにより、測定対象 1003 の表面形状を知ることができる。測定対象面 1003 a の凹凸が触針 1001 の振幅を上回る場合は、X 軸駆動機構 1010 によりテーブル 1011 を移動させて測定対象物 1003 を再位置決めすることにより、測定対象物 1003 の表面形状を計測することが可能である。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】 しかしながら、上記した微細表面形状測定装置においては、アクチュエータ 1002 単体で触針 1001 を駆動しているため、つまり、オープンループで触針 1001 を駆動しているため、アクチュエータの特性（熱変形、ヒステリシス、ドリフトなど）の影響により振動の状態（振幅や振動中心）が不安定となり、計測精度を悪化させてしまう問題点がある。また、アクチュエータ 1002 の振幅よりも大きな凹凸を計測する場合、X 軸駆動機構 1010 を補助として用いるため、X 軸駆動機構 1010 の位置決め精度が全体の計測精度を悪化させてしまう問題点がある。さらに、一般に X 軸駆動機構 1010 の位置決め速度は振動アクチュエータ 1002 に比べて遅いため、計測全体にかかる時間を長くしてしまう問題点もある。また、触針 1001 と測定対象物 1003 との接触検出のために電圧を印加し電気導通を検出しており、測定対象が電気導電体に限られるといった問題点もある。さらに、微細穴形状の垂直断面以外に水平断面を調べたいときに、どのような位置決め機構が必要になり、さらにそれらをどのように協調して動かしたらよいのかについても方法論が示されていないといった問題点がある。

【0004】 本発明は、以上の問題点を解決し、高精度を維持したまま導電体・絶縁体の微小表面形状を高速に

計測可能とする計測自由度の高い表面形状測定方法およびその装置を提供することを目的とする。

【0005】

【課題を解決するための手段】この課題を解決するために本発明は、触針を振動させるためのアクチュエータの不都合な特性を改善するために変位センサを用いたフィードバック制御を実施する。また、触針の変位可能領域を大きく取るために、アクチュエータとして圧電素子と変位拡大機構とを組み合わせたり、ペンディングモードで変位する圧電素子を使う。このようにして触針の位置決め精度を高めながら同時に変位範囲を広げることで、測定精度を高めながら、被測定物の凹凸量が大きいときでも、従来例におけるX軸駆動機構のような補助移動手段を不要とした測定を可能とする。このことにより、X軸駆動機構により発生する計測精度の低下や計測スピードの低下を防ぐことができる。

【0006】また、非導電体の測定対象に対しては、圧電薄膜を周囲に形成した触針を使用し、触針の歪みに比例した圧電薄膜電圧を検出することにより接触・非接触を判定し、接触状態を一定に保つように触針を制御してやることで、非導電体の形状測定を行うことができる。

【0007】さらに、触針とこれを駆動するアクチュエータの両方を回転させる主軸を設けることにより、従来は縦断面だけだった形状測定を横断面の測定も可能とすることができる。さらに主軸の回転角を、測定対象を搭載したステージの位置と協調して制御することにより、任意横断面形状の測定が可能となる。

【0008】これにより、従来よりも計測精度が高く、計測速度も速く、導電体・被導電体を問わず検出が可能で、縦断面・横断面のいずれもが自動計測できるような微細表面形状測定装置が得られる。

【0009】

【発明の実施の形態】本発明の請求項1に記載の発明は、触針を取り付けた微小変位が可能なアクチュエータの変位をモニタする変位センサを有し、この変位センサからの信号をもとにフィードバック制御により前記アクチュエータを駆動することを特徴とする微細表面形状測定方法であり、高精度を維持したまま導電体や絶縁体の微細表面形状を高速に計測可能とする作用を有する。

【0010】本発明の請求項2に記載の発明は、微小変位が可能なアクチュエータに取り付けられた触針を位置決め位置を中心として微振動させ、その時の触針と測定対象面との接触を検出して、その接触時間の触針の振動周期に対する比率が常に一定となるように前記アクチュエータの位置決め位置を調整し、この位置決め位置を記録しながら前記触針のある経路に沿って移動させることにより測定対象面の凹凸形状を求めることを特徴とする微細表面形状測定方法であり、高精度を維持したまま導電体や絶縁体の微細表面形状を高速に計測可能とする作用を有する。

【0011】本発明の請求項3に記載の発明は、触針を取り付けた微小変位が可能なアクチュエータの変位をモニタする変位センサを有し、この変位センサからの信号をもとにフィードバック制御により前記アクチュエータを駆動するとともに、前記微小変位が可能なアクチュエータに取り付けられた触針を位置決め位置を中心として微振動させ、その時の触針と測定対象面との接触を検出して、その接触時間の触針の振動周期に対する比率が常に一定となるように前記アクチュエータの位置決め位置を調整し、この位置決め位置を記録しながら前記触針のある経路に沿って移動させることにより測定対象面の凹凸形状を求めることを特徴とする微細表面形状測定方法であり、高精度を維持したまま導電体や絶縁体の微細表面形状を高速に計測可能とする作用を有する。

【0012】本発明の請求項4に記載の発明は、触針を振動させるためのアクチュエータとして圧電素子を使用するとともに、この圧電素子の変位をモニタする変位センサを備えた振動ヘッドと、前記振動ヘッドの圧電素子を駆動する駆動回路と、前記触針と測定対象面との接触を電気的導通により検出する導通検出回路と、前記振動ヘッドの変位センサからの信号および導通検出回路からの信号をもとに触針の振動中心と測定対象面の相対間隔が常に一定であるように前記駆動回路をフィードバック制御する手段とを備えた微細表面形状測定装置であり、高精度を維持したまま導電体や絶縁体の微細表面形状を高速に計測可能とする作用を有する。

【0013】本発明の請求項5に記載の発明は、振動ヘッドの圧電素子として、曲げモードで変形する圧電素子単体または積層圧電素子と変形拡大機構の組み合わせを用いることを特徴とする請求項4記載の微細表面形状測定装置であり、圧電素子の変位可能長さを広くとることにより触針の測定可能領域をひろげ、凹凸量の大きい測定対象物に対しても計測速度や計測精度を低下することなく測定が可能となる作用を有する。

【0014】本発明の請求項6に記載の発明は、振動ヘッドが、触針を保持する触針ホルダーと、前記触針ホルダーに固定されて前記触針ホルダーを変位させる円筒型PZT素子と、前記円筒型PZT素子を一定の位置に固定する固定板と、前記固定板に設けられた発光素子と、前記発光素子からの光を通過させる微小孔を有するピンホールプレートと、前記微小孔を通過した光を受光する受光素子とを備えた請求項4記載の微細表面形状測定装置であり、小型で高性能の振動ヘッドを実現できるという作用を有する。

【0015】本発明の請求項7に記載の発明は、発光素子が発光ダイオードであり、受光素子が4分割フォトダイオードである請求項6記載の微細表面形状測定装置であり、小型で高性能の振動ヘッドを実現できるという作用を有する。

【0016】本発明の請求項8に記載の発明は、導通検

出回路が、微弱な交流電圧を発生する交流電源と、触針と測定対象面との接触による短絡電流を検出する手段と、触針までのリードと測定対象面との間に発生する浮遊容量を防止するために前記リードに設けられたガードシールドとを備えた請求項 4 記載の微細表面形状測定装置であり、触針と測定対象物面の接触を電気的に検出する場合に発生しやすい金属表面の酸化や汚染による絶縁膜の発生を防止するという作用を有する。

【0017】本発明の請求項 9 に記載の発明は、導通検出回路が、触針と測定対象面との間に発生する浮遊容量を防止するために前記触針に設けられたガードシールドを備えた請求項 8 記載の微細表面形状測定装置であり、触針と測定対象物面の接触を電気的に検出する場合に発生しやすい金属表面の酸化や汚染による絶縁膜の発生を防止するという作用を有する。

【0018】本発明の請求項 10 に記載の発明は、触針を取り付けた微小変位が可能なアクチュエータと、前記アクチュエータを駆動する駆動手段と、前記アクチュエータの変位をモニタする変位センサと、前記変位センサからの信号をもとに前記アクチュエータをフィードバック制御するための信号を前記駆動手段へ送出する制御手段とを備えた微細表面形状測定装置であり、アクチュエータの特性を改善することで測定精度を高めながら、アクチュエータの変位範囲を広げることで触針の計測範囲を大きくするという作用を有する。

【0019】本発明の請求項 11 に記載の発明は、アクチュエータとして、たとえば積層圧電素子と挺子のような変形拡大機構の組み合わせを用いることにより、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置であり、圧電素子の変位可能長さを広くとることにより触針の測定可能領域をひろげ、凹凸量の大きい測定対象に対しても計測速度を低下することなく測定が可能となるという作用を有する。

【0020】本発明の請求項 12 に記載の発明は、アクチュエータとして、たとえばバイモルフ圧電素子を用いることにより、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置であり、圧電素子の変位可能長さを広くとることにより触針の測定可能領域をひろげ、凹凸量の大きい測定対象に対しても計測速度を低下することなく測定が可能となるという作用を有する。

【0021】本発明の請求項 13 に記載の発明は、アクチュエータとして、たとえば積層圧電素子とステッピングモータと送りねじにより駆動されるスライド機構の組み合わせを用いることにより、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置であり、スライド機構の変位可能長さを広くとることにより触針の測定可能領域をひろげ、凹凸量の大きい測定対象に対しても計測速度を低下することなく測定が可能となるという作用を有する。

【0022】本発明の請求項 14 に記載の発明は、前記電磁モータを位置決め制御しながら駆動する駆動手段と、前記変位センサからの信号をもとに前記電磁モータをフィードバック制御するための信号を前記駆動手段へ送出する制御手段とを備えた請求項 13 記載の微細表面形状測定装置であり、スライド機構の変位可能長さを広くとることにより触針の測定可能領域をひろげ、凹凸量の大きい測定対象に対しても計測速度を低下することなく測定が可能となるという作用を有する。

【0023】本発明の請求項 15 に記載の発明は、アクチュエータとして、たとえば永久磁石と組み合わせられたボイスコイル単体、あるいはボイスコイルと積層圧電素子を組み合わせを用いることにより、触針の変位領域を広く確保することを特徴とする請求項 10 記載の微細表面形状測定装置であり、ボイスコイルの変位可能長さを広くとることにより触針の測定可能領域をひろげ、凹凸量の大きい測定対象に対しても計測速度を低下することなく測定が可能となるという作用を有する。

【0024】本発明の請求項 16 に記載の発明は、触針と測定対象面の間に電圧を印加し、触針と測定対象面との接触を電気的導通により検出する導通検出手段を備えた請求項 10 から 15 のいずれかに記載の微細表面形状測定装置であり、導電体の測定対象に対して効果的に接触を検出できるという作用を有する。

【0025】本発明の請求項 17 に記載の発明は、触針の周囲にたとえば ZnO や PZT などの圧電体薄膜を形成して触針のたわみ量を電圧として検出することにより、触針と測定対象面との接触を検出する接触検出手段を備えた請求項 10 記載の微細表面形状測定装置であり、非導電体の測定対象に対して効果的に接触が検出できるという作用を有する。

【0026】本発明の請求項 18 に記載の発明は、前記圧電体薄膜を付着した触針のたわみ量の信号と所定の閾値とを比較し、触針たわみ信号がこの閾値を上回る場合は触針が測定対象面に接触していると判定し、下回った場合は触針が測定対象面に接触していないと判定する信号処理装置を有することを特徴とする請求項 17 記載の微細表面形状測定装置であり、前記圧電薄膜からの信号を簡単な処理で接触検出信号に変換できるという作用を有する。

【0027】本発明の請求項 19 に記載の発明は、前記圧電体薄膜を付着した触針のたわみ量の信号と前記アクチュエータの変位信号を統計的処理により比例係数を順次計算し、両者に正の比例関係がある場合は触針が測定対象面に接触していると判定し、両者に比例関係が見られない場合は触針が測定対象面に接触していないと判定する信号処理装置を有することを特徴とする請求項 17 記載の微細表面形状測定装置であり、前記圧電薄膜から生じる信号がノイズに埋もれている場合や、信号ゲインや信号レベルが変化してしまう場合においても、正しく

接触、非接触を検出できるという作用を有する。

【0028】本発明の請求項20に記載の発明は、前記接触検出手段の出力信号から触針の振動1周期に占める接触時間の割合を測定するデューティ計測手段と、このデューティ計測手段の出力信号から前記接触時間の触針の振動周期に対する比率が常に一定となるように前記アクチュエータの位置決め位置を調整する制御手段とを備えた請求項16または17に記載の微細表面形状測定装置であり、アクチュエータの特性を改善することで測定精度を高めながら、アクチュエータの変位範囲を広げることで触針の計測範囲を大きくするという作用を有する。

【0029】本発明の請求項21に記載の発明は、触針とそれを加振する前記アクチュエータを360度以上、高い精度で回転させる主軸と、測定対象をXYZの3自由度で位置決めする位置決めステージとを有することを特徴とする請求項10から20のいずれかに記載の微細表面形状測定装置であり、触針の検出ポイントを順次回転しながら、穴内面の全周囲を検出できるという作用を有する。

【0030】本発明の請求項22に記載の発明は、前記主軸の先端に取り付けられた前記アクチュエータからケーブルを外部に引き出すに際し、主軸と同時に同心円上を回転するケーブル固定部を有し、前記主軸からケーブル固定部までの間のケーブルをできるだけ主軸外周にそって引き回すことにより、主軸回転に伴いケーブル曲げが変化することによる不必要な外力が前記主軸に加わることを防止することを特徴とする請求項21記載の微細表面形状測定装置であり、ケーブルの曲げに起因する主軸の回転精度の低下を防止するという作用を有する。

【0031】本発明の請求項23に記載の発明は、触針が測定対象の表面を検出しながら位置決めステージが移動するに際し、直前に検出された測定対象面を平面で近似し、その平面が直後に検出される測定対象面であるという仮定を立て、この仮定にしたがって位置決めステージを移動し主軸の回転を制御することを特徴とする請求項21記載の微細表面形状測定装置であり、任意の横断面形状に対して触針がその表面形状に自動追従しながら形状を計測できるという作用を有する。

【0032】本発明の請求項24に記載の発明は、顕微鏡と画像認識装置を有し、前記位置決めステージ上の固定点と測定対象上の測定点を顕微鏡画面内で順次位置認識することにより、測定点の位置決めステージ上の相対位置を知り、その後自動で測定点を触針の直下に持ってくるように位置決めステージを移動することを特徴とする請求項21記載の微細表面形状測定装置であり、顕微鏡と位置決めステージによる座標管理が可能となり、微細な測定対象に対して触針を正確に挿入できるという作用を有する。

【0033】以下、本発明の実施の形態について、図面

を用いて説明する。

(実施の形態1) 本発明では、触針の振動手段として圧電素子を用いる。圧電素子を振動アクチュエータとして用いる場合、1) 圧電素子自身が振動により発熱し熱変形を起こす、2) 圧電素子のヒステリシスにより変位と印加電圧が一对一に対応しない、3) 素子の特性の初期ばらつきや経時変化により振動振幅が一定せず、一定電圧を印加して放置すると、初期変位の数%のドリフトが発生するなどの問題がある。これを解決するには、変位センサを組み込み、位置のフィードバックを施すことが一般的である。本実施の形態では、圧電素子を曲げモードで使うことにより大量変位を可能とし、さらに変位センサによるフィードバックで圧電素子の変位特性を改善し、振動中心を任意の位置に変えながら微小振動を発生できるような振動ヘッドを用いている。

【0034】図1は本実施の形態1に用いられる圧電素子と変位センサから構成される振動ヘッドを示している。図1において、1は触針、2は触針1を保持する触針ホルダー、3は触針ホルダー2を変位させる円筒型PZT素子、4は触針ホルダー2の変位をモニタするための変位センサおよび受光素子としての4分割ホトダイオード、5は微小孔5aを有するピンホールプレート、6は発光素子としてのLED、7は円筒型PZT素子3を一定の位置に固定する固定板である。

【0035】図2は円筒型PZT素子3を示し、円筒の内面に内側全面電極10が、外面には4分割外側電極11が形成され、一方の端面を固定した状態で電圧 $V_x$ 、 $V_y$ が加えられることにより、他方の端面はX、Y方向に数10 $\mu\text{m}$ 変位し(曲げモードの変位)、Z方向に数100nmの変位を発生する(縦方向の変位)。

【0036】次に、上記振動ヘッドの動作について説明する。図1において、4分割ホトダイオード4は、LED6の光をピンホールプレート5の直径数100 $\mu\text{m}$ の微小孔5aを通して受光する。この結果、図3に示すように4分割ホトダイオード4上には、微小孔5aの形状を有する光スポット8が形成される。触針ホルダー2の変位にしたがって、4分割ホトダイオード4も変位するので、光スポット8も4分割ホトダイオード4上を移動することになる。数10 $\mu\text{m}$ 以内の変位であれば、変位量とホトダイオード4の出力の間に次の関係が成立する。

P1~P4を4分割ホトダイオード4の出力とし、 $D_x$ 、 $D_y$ を触針ホルダー2の変位とすると、

$$D_x = k \cdot \{(P1 + P3 - P2 - P4) / (P1 + P2 + P3 + P4)\}$$

$$D_y = k \cdot \{(P3 + P4 - P1 - P2) / (P1 + P2 + P3 + P4)\}$$

となる(ただし、kは比例定数)。このホトダイオード4からの出力を円筒型PZT素子にフィードバックすることにより、素子の特性に影響されにくい触針ホルダー2の位置決めをすることができる。同時に、触針ホルダ

一2に固定された触針1の先端にも安定した変位量が発生する。

【0037】図1に示した振動ヘッドは、図4および図5のような振動ヘッドによっても置き換え可能である。図4ではピンホールプレート5を触針ホルダー2に取り付け、4分割ホトダイオード4およびLED6を固定板7に取り付けている。円筒型PZT素子3の変位により移動するのはピンホールプレート5であるが、原理的には図1に示したものと何ら変わらない。図5においては、図1の構成に対しレンズ9が追加されている。レンズ9の働きは、ピンホールプレート5の微小孔5aの像を4分割ホトダイオード4上に結像するためにあり、これにより図1と同じ効果を得ることができる。さらに、レンズ9に非点収差を持たせることにより、触針ホルダー2のZ方向の変位を4分割ホトダイオード4により検出することも可能となる。この原理はCDプレーヤーの読み出し光学系のフォーカシングに用いられるものと同じである。

【0038】以上の振動ヘッドを使用した微細表面形状測定装置の全体構成を図6に示し、振動ヘッドの制御回路を図7に示す。図6において、微細表面形状測定装置11は、図1、図4、図5のいずれかに示した振動ヘッド12を有し、その下部には触針1が取り付けられている。振動ヘッド12は、駆動回路13により駆動され、その変位センサにより検出された変位は、変位センサアンプ14により制御回路15へ取り込まれる。触針1と測定対象物16の間の接触は、導通検出回路17により検出され、同じく制御回路15へ取り込まれる。測定対象物16は、回転機構18によりZ軸回りに回転させられ、またZ軸送り機構19によりZ方向へと移動させられる。これらの機構により、触針1は測定対象物16の測定面をくまなくスキャンすることが可能となる。

【0039】図7において、駆動回路13により駆動される振動ヘッド12が変位すると、この変位が触針1と測定対象物16の接触を発生し、導通検出回路17がこれを検出する。さらに、デューティ計測回路24がデューティサイクルを算出する。振動ヘッド12の変位は、内側制御ループ25を通して変位センサアンプ14により増幅され、ゲイン22および補償器23を通して駆動回路13にフィードバックされ、振動ヘッド12の特性を改善する。この結果、三角波発生回路21の発生する三角波形に従って、振動ヘッド12が忠実に振動することになる。さらに外側制御ループ29は、デューティサイクルが特定の値（たとえば50%）となるように、デューティ計測回路24の出力と基準値26との差を取り、PI制御器27およびゲイン28を介してフィードバックをかけ、触針1の振動中心と測定対象物面の相対間隔が常に一定であるように自動制御する。この状態で図6のZ軸送り機構19により測定対象物16をZ方向に送りながら、ゲイン28の出力を記録しつづければ

（振動中心位置に相当する信号）、測定対象物16の縦断面形状が求められ、また、回転機構18を回転させれば、測定対象物16の横断面形状が求められることになる。

【0040】以上のように、本実施の形態1によれば、内側制御ループ25の働きによりPZT素子の好ましくない特性（熱変形によるドリフト、ヒステリシス、特性ばらつき、特性経時変化）の計測精度にあたる悪影響を排除し、さらに外側制御ループ29により測定対象物面の凹凸が振動振幅（ $2\mu\text{m}$ ）よりも大きい場合でも、数十 $\mu\text{m}$ の範囲で触針1が測定面に追従することを可能にし、さらに従来用いられていたX軸駆動機構を不要とし、これにより計測精度と計測時間を大幅に改善することが可能になる。

【0041】なお、振動ヘッド12内の変位センサとしての4分割ホトダイオードは、XY2軸の入出力をもっているため、実際の制御系においてはX軸のループとY軸のループを別々に構成しているが、振動ヘッド12の振動の方向はX軸あるいはY軸方向のみに限定したものではなく、360度あらゆる振動方向が実現可能であり、また、直線的な振動だけではなく円振動や楕円振動も発生可能である。図6に示した装置による実際の測定においては、1方向の振動が発生できれば十分である。

【0042】また、図2に示したPZT素子3の外面電極11の数は2でもよく、4分割ホトダイオード4の分割数も2でもよい。この場合は、振動発生パターンは直線振動だけとなるが、構成部品の簡略化ができるというメリットがある。さらに、2枚の圧電素子板を貼り合わせたバイモルフ圧電素子を用いても、直線振動を発生することができ、振動変位を市販の非接触変位センサ（例えば三角測量型の光センサなど）により検出するようにすれば、手軽に振動ヘッドを構成することができる。

【0043】（実施の形態2）図8は本発明の第2の実施の形態における微細表面形状測定装置の構成を示している。第1の実施の形態との違いは、回転機構18とZ軸送り機構19を振動ヘッド12側に移動したことと、測定対象物16をXYステージ30の上に取り付けた点である。このような構成をとることにより、生産ラインにおいて測定対象物16に穴加工をした直後に、XYステージ30により測定対象物16を振動ヘッド12直下に移動させることができ、振動ヘッド12が回転機構18とZ軸送り機構19の働きにより、加工直後の測定対象物面16を計測するインライン計測を行うことができる。なお、振動ヘッド12の中心と回転機構18の軸の間の偏心量 $e$ は、加工形状（穴径）に併せてあらかじめ適切な量に設定しておくことが望ましい。

【0044】（実施の形態3）実施の形態1および実施の形態2における触針1と測定対象物16の接触を検出する導通検出回路17は、直流電圧をかけて短絡電流を見というのが一般的な構成である。通常は図9（a）

に示すように、直流電圧 31 に測定対象物 16 をマイナス（グランド）側に、触針 1 をプラス側に接続し、電流検出抵抗 32 を介してコンパレータ 33 により短絡電流を検出するような構成がとられる。この時、測定雰囲気中には水蒸気が存在するため、測定対象物 16 と触針 1 の間にも水が存在し、電気分解作用によりマイナス側の金属はイオン化する傾向がある。このため、同一箇所を計測し続けた場合に、局所的に酸化物等が測定対象物 16 の表面上に形成されることがあり、安定した電気電導が得られなくなることがある。これに対し、図 9（b）に示すように、直流電源 34 のマイナス側に触針 1 を接続し、プラス側に測定対象物 16 を接続してやると、測定対象物 16 表面の酸化は防げるが、触針 1 側に問題が出る可能性がある。また、直流電圧を微小な触針 1 の先端と測定対象物 16 との間に印加することは、局所的に大きな電界強度を発生させ、その結果、雰囲気中の塵や埃を吸着して絶縁層を形成することもある。もちろん、実際の計測では、測定対象物 16 の表面を触針 1 がスキャンするので、計測に不具合が起きることはまれであるが、触針 1 が何らかの原因で同一箇所にとどまった場合に障害が起きる可能性が高い。

【0045】図 10 は電気分解作用を防止するための交流電圧を用い、さらに強度電界による静電吸着を防ぐために電圧実効値を下げる導通検出回路 17 の構成を示している。交流電源 41 からの電圧は、電流検出抵抗 42 を介して触針 1 に伝えられる。このとき、触針 1 までのリード 43 と測定対象物 16（グランド）との間には大きな浮遊容量 44 が発生しており、このままだと交流電圧 41 に対して浮遊容量 44 のみで短絡状態となり、触針 1 と測定対象物 16 との接触による短絡が検出できない恐れがある。これを防止するため、バッファアンプ 45 とガードシールド 46 によりリード 43 とグランドとの静電結合を防いでいる。短絡電流は、電流検出抵抗 42 の電圧を検波回路 47 で検波することにより検出できる。検波回路 47 は、一般に感度を高めることが容易なので、交流電圧 41 の電圧実効値を十分微小電圧にすることが可能である。このような微小交流電圧を用いることにより、電解作用や静電吸着作用を最小限に抑えることができるが、検波回路 47 やガードシールド 46 などの構成の複雑さが増すので、場合によっては交流電圧と直流電圧を使いわけるか、または混合したような形で適用することが望ましい。

【0046】（実施の形態 4）図 11 はガードシールド 46 をリード 43 のみでなく、触針 1 上にも形成した例を示す。断面円形の触針 1 の周囲には、絶縁層 48 およびガードシールド 49 が順に形成され、マイクロマシンのプロセス技術により、最後に電極接続部 1a とその反対側の円錐状に突出した電極先端部 1b 上のガードシールド 48 および絶縁層 49 が部分的に除去される。この方法により、リード 43 および触針 1 と測定対象物 16

との間の浮遊容量 44 を極限まで減らすことができ、電極先端部 1b と測定対象物 16 との間の静電容量 50 だけを検出できることになり、走査型容量顕微鏡の原理を用いて非接触な形状測定も可能となる（電子材料 1993 年 5 月号、P. 110～114）。この場合、測定対象物の表面状態（酸化や汚染）によらない表面検出が可能になるため、接触・非接触いずれの形状測定においても、測定の安定化に役立つ。

【0047】（実施の形態 5）以上述べた実施の形態では、測定対象物 16 として導体を想定してきたが、これらの手法を電気絶縁体の測定対象物面に適応する方法を図 12 に示す。振動ヘッド 12 と触針 1 との間に小さな圧電素子 51 を設けることにより、触針 1 が測定対象物 16 に接触する際の衝撃あるいは接触圧力を検出することができる。検出用圧電素子 51 からの出力は、プリアンプ 52 を通して制御回路 15 に導かれ、接触の瞬間または接触の期間が検出される。接触の瞬間が検出される場合は、振動に対する接触タイミングの位相ずれが常に一定になるように圧電素子 51 を制御する（図 7 の外側制御ループ 29）。また、接触の期間が検出される場合は、振動の周期に対するデューティサイクルを算出し、これが一定になるように圧電素子 51 を制御する。なお、検出用圧電素子 51 は、触針のまわりにプロセス技術により形成した圧電材料薄膜でもよい。また、触針 1 の測定対象物 16 への接触を、振動ヘッド 12 内の変位センサまたは新たに設けた別の変位センサにより検出しても、同じ効果が得られる。

【0048】（実施の形態 6）本実施の形態 6 では、圧電素子に梃子による変位拡大機構を組み合わせることにより大量変位を可能とし、さらに変位センサによるフィードバックで圧電素子の変位特性を改善し、振動中心を任意の位置に変えながら微小振動を発生できるような振動手段を用いている。

【0049】図 13 は本実施の形態における振動手段を示している。図 13 において、61 は触針、62 は触針 61 が固定されている可動ステージ、63 は可動ステージ 62 を収容する筐体、64 は可動ステージ 62 を平行移動するようにガイドする弾性ヒンジにより可動ステージ 62 と筐体 63 に結合された平行ばね、65 は微小変位を発生する圧電素子、66 は圧電素子 65 の変位を拡大するために圧電素子 65 寄りに支点 66a を有する梃子、67 は拡大された変位を可動ステージ 62 に伝える連結部材である。また可動ステージ 62 には、連結ロッド 68 を介して差動トランス 69 のコア 70 が取り付けられている。変位センサである差動トランス 69 は、交流電源 71 から高周波を流す一次コイル 72 と、コア 70 の変位に応じて高周波を発生する二次コイル 73 により構成され、発生した高周波は、同期検波回路 74 により可動ステージ 62 の変位信号に復調される。この変位信号は、可動ステージ 62 の変位指令信号と比較器 75

で比較され、PI制御器76により低周波数成分が強調されたのち、圧電素子駆動手段である高電圧アンプ77を介して再び圧電素子65に戻される。

【0050】このようなフィードバックループの存在により、圧電素子65の熱膨張、ヒステリシス、ドリフトをキャンセルすることができる。差動トランス69は極めて安定性が高いので、精度を要求される今回の構成には望ましいが、他の変位センサ、たとえば静電容量型ギャップセンサや渦電流型ギャップセンサなども利用することができる。また、PI制御器76の比例ゲインと積分ゲインは、可動ステージ62が発振的な振る舞いをしないように調整する必要がある。一般的に、積分ゲインは、変位の定常誤差をキャンセルできるので、許される範囲で大きくすることが望ましい。また、比例ゲインは、可動ステージ62の応答性を改善するので、今回のように高速(100Hz)で振動させるには、大きいことが望ましい。

【0051】図14に別の振動手段の構成例を示す。図13との違いは、圧電素子にバイモルフ圧電素子78を使用した点である。バイモルフ圧電素子78は、2枚の圧電板を張り合わせ、その片側を伸長するように電圧をかけ、他方に圧縮するように電圧をかけることで、両者のバランスにより曲げモードで変位することを特徴とする。一般的には、図13の圧電素子(積層圧電素子)65の10倍以上の変位が達成可能であるが、発生力は弱い。しかしながら、今回は極めて軽量の触針61とコア70を動かすだけであるので、バイモルフ圧電素子78でも十分である。また、バイモルフ圧電素子78を使った場合、全体の構成が簡略化され、振動手段の低価格化が可能である。

【0052】図15に別の振動手段の構成例を示す。図13との違いは、触針81を取り付けた圧電素子82の変位能力の不足を、ステッピングモータ85により送りねじ84を介して駆動されるステージ83により補う点である。触針81の変位量は、差動トランス69を介して変位指令信号と比較器75で比較される。その差をハイパスフィルタ86、PI制御器76および高電圧アンプ77を介して圧電素子82にフィードバックされる。同時に比較器75の差信号は、I制御器87を介して位置決めコントローラ88への位置指令となり、ステッピングモータ85が回転してステージ83が位置決めされる。ハイパスフィルタ86とI制御器88の役割は、差信号を周波数成分により圧電素子82とステッピングモータ85に振り分けることである。高い周波数の細かい動きは圧電素子82に行わせ、低い周波数の大きい動きはステージ83に行わせるように、フィルタ86、制御器87のゲインを調整することが必要である。

【0053】図16に別の振動手段の構成例を示す。図13との違いは、触針91を可動ステージ92に取り付け、この可動ステージ92をボイスコイル93に固定し

て触針91を駆動していることである。ボイスコイル93は永久磁石94と磁気回路95により構成される磁気ギャップに平行ばね96を介して配置され、高電流アンプ98により電流が流されると、振動方向に変位が発生する。ボイスコイル93に取り付けられた可動ステージ92は平行板バネ22により平行移動するようにガイドされる。可動ステージ92の変位は、差動トランス69のコア70により検出され、同期検波回路74で検波された後、変位指令信号と比較器75で比較され、その差をPID制御器97から高電流アンプ98を介してボイスコイル93にフィードバックされる。ボイスコイル93によるモータは振動的になりやすいので、PID制御器97の微分ゲインによりダンピングを与えてやる必要がある。

【0054】次に、以上の振動手段の制御方式を図17に示す。図17は主として図13の振動手段の制御方式を表すが、図14～図16の振動手段を採用した場合でもほぼ同じ構成で十分である。図13の筐体63内の装置がアクチュエータ104に相当し、駆動回路103

(図1では高電圧アンプ72)により駆動される。駆動信号は、三角波発生回路101から三角波形を基礎とするPI制御器102を通したフィードバック信号である。変位センサ105は差動トランス69と同期検波回路74の組み合わせを使用しているが、精度さえ十分であれば他のセンサでも代用可能である。フィードバック回路は、アクチュエータ104の位置決めを正確にするためのマイナーループ106と、触針61と被測定対象の接触状態を一定に保つためのメジャーループ111とを備えている。

【0055】メジャーループ111において、まず触針61と被測定対象との導通が導通検出回路107により検出される。導通検出回路107は図34と同じく電気導通をみるものである。導通検出信号は、デューティ計測回路108において振動1周期に占める接触時間の割合に変換される。この割合(デューティ比)は指令値109(たとえば50%)と比較され、I制御器110を介して、三角波発生回路101の信号に足し込まれる。この結果がマイナーループ106の変位指令信号となるが、微小な振動の振動中心を自在に変えながら接触状態を一定に保ち、同時にアクチュエータ104の不都合な特性による位置決め精度の悪化を防止する働きが図17に示す制御系で可能となる。そして、I制御器110の出力を記録しながら被測定対象を移動することにより、現在の被測定対象の表面の位置が計測できる。以上のようなメジャーループ111の存在により、触針61は常に一定の接触を測定対象物と保つように位置制御される。

【0056】このような制御は測定対象物側を細かく動かしてやることでも可能であるが、そのようにすると2つの問題が発生する。1つは、測定対象物やこれを移動

するステージは一般的に重くなってしまうため動きが遅くなってしまう点、2つ目は、メジャールーブ111の中に測定対象物を移動するステージが要素として入ってしまうために、計測精度がステージ精度に影響されてしまう点である。1つ目の欠点は測定速度の低下につながり、2つ目の欠点は精度保証をするためには精度の高いステージを使わねばならないという制約を設けることになり、生産現場で任意のステージと組み合わせて使用するとき問題となる。

【0057】図18は上記したデューティ計測回路108の構成を示したものである。デューティ比計測の基本は、全周期に対する接触時間の比率をクロックパルスのカウント結果からCPU212により求めることである。クロック207は100kHz程度のもを用い、これらはゲート209、215を通してカウンタ210、216、218へ供給される。これによりゲートが信号により開かれた間だけパルスがカウンタへ伝わりカウントされる。カウンタの値は、リセットされる前にラッチ211、217、219に読み込まれ、さらにこの値はCPU212に取り込まれて比率計算される。カウンタをリセットする信号は、三角波発生回路101から得られる発生波形に同期した基準となるSYNC信号201を立ち上がり検出回路202に入力し、さらにディレイ203を通したものを利用する。このリセット信号は、触針が被測定物からもっとも離れた時に発生するようにディレイ203は調整されている。ゲート215は、導通検出信号206がアクティブのときだけカウンタ216が動作するため、デューティ比213はラッチ217の値をラッチ219の値で割ったものである。次に、ディレイ204とワンパルス発生回路205は、触針が被測定物よりもっとも離れた瞬間から前後の1~2ミリ秒の間アクティブになるようなパルスを発生する。このパルスの間に接触が検出されるとラッチ211にその結果が求まるが、ラッチ217の値よりもラッチ211の値が大きいときは、接触が主として触針が被測定物を離れようとしたときに発生していることを意味し、この結果、異常接触信号214が出力される。異常接触が発生したときにそのまま図5に示した制御系を動作させつづけると触針の破損につながるので、全制御系を非常停止させる必要がある。

【0058】図19は以上説明してきた振動手段を搭載し、任意の被測定物の形状測定が可能な微細形状測定装置の構成図である。触針301は触針ホルダ302を介してアクチュエータ303に固定されている。アクチュエータ303は図17に示した制御回路により制御されている。アクチュエータ303と触針301は、回転主軸304により360度以上回転することができる。回転主軸304は支持板305に固定されている。被測定物306は、サンプルホルダ307を介してZ軸ステージ308に固定され、さらにY軸ステージ309、X軸

ステージ310と接続され、空間内で3自由度の正確な位置決めが可能となっている。なお、被測定物の傾きを補正するためのティルトステージをサンプルホルダ307に付加してもよい。X軸ステージ310は、その短いストロークを補うためのX軸ガイドレール311上に載せられており、両端で位置決め固定できるように位置決めストッパ312、313が設けられている。X軸ステージ310のストロークが十分長くとれる場合は、このようなX軸ガイドレール311は必要ない。被測定物306は、X軸ガイドレール311の左端で顕微鏡314の直下に移動し、フォーカスノブ315で焦点合わせが行われ、TVカメラ316により観察できる。顕微鏡314およびTVカメラ316は、支持板317に取り付けられている。装置全体は定盤318の上に載せられ、床面からの振動を防止する目的で除振台319を設けている。

【0059】図20は回転主軸304の詳細図、図21はその下面図である。回転主軸304の回転精度（たとえば真円度）は、全体の計測精度に大きく影響するので、できるだけ劣化しないよう工夫されている。極めて高い精度に研削仕上げされた主軸スピンドル320は、スラストベアリング321を介して予圧ばね322により上方に引っ張られており、これを鋼球323が受けとめて、上下方向の主軸スピンドル320の位置を固定している。さらに、一对のV溝ブロック324が主軸スピンドル320を保持することにより、主軸スピンドル320は、回転の自由度のみを残して正確に拘束された状態となる。V溝ブロック324は、弾性締結体325を介して取付プレート326およびねじ327により2つが弾性的に結合され、全体としてC型の形状となり、予圧ばね328によりC型を閉じるように力を加えている。V溝ブロック324を2つ使用する理由は、主軸スピンドル320の軸まわりに対称に4点で支えることにより、回転にともない主軸スピンドル320にV溝ブロック324から加わる外力の合計を極力小さくするためである。V溝ブロック324と主軸スピンドル320の間には、回転時の摩擦トルクを低減してスティックスリップを無くす目的と、主軸スピンドル320およびV溝ブロック324の双方が磨耗することを防止する目的で、樹脂シート329が挟み込まれている。樹脂シート329としては、潤滑性の高いフッ素系樹脂または高密度ポリエチレン系樹脂（たとえばNTNベアリー）などが適している。V溝ブロック324は、主軸スピンドル320のねじりに対する剛性を高めるために上下2つに分離して、そのスパン長をかせぐこともできる。また、2つのV溝ブロック324を弾性締結体325により結合せず、左右両側から予圧ばねにより主軸スピンドル320を挟み込むことも可能である。また、V溝ブロック324を1つだけとし、他の手段（たとえばゴムローラなど）により主軸スピンドル320をそのV溝ブロック

324に押し当てることも可能である。このような主軸スピンドル320の精度を保証するために用いられるV溝ブロック324は平面研削により加工し、主軸スピンドル320は円筒研削により加工すればよいので、比較的製作が容易で、かつ、精度も高めることが可能である。もちろん回転スピンドル320は、エアスピンドルに置き換えることも可能である。エアスピンドルの方が回転精度も高めやすく、また変動負荷に対する剛性も高いが、エアスピンドルの場合は外部から圧縮空気の供給が必要であること、また、価格が高価になるなどの欠点がある。本実施の形態では、装置全体をコンパクトにまとめる必要性と、主軸スピンドル320にかかる負荷が小さく、また一定であることから円筒状の主軸スピンドル320をV溝ブロック324にて保持する構成を取っている。

【0060】主軸スピンドル320からは回転アーム330が伸びており、回転アーム330は、回転ステージ331と接触している。回転ステージ331は、主軸スピンドル320と同心円上で回転するが、回転精度が悪いため回転アーム330と回転ステージ331の間には、わざとがたつきを持たせて誤差が伝わらないようにし、また接触は埋め込まれた鋼球により点接触となるように工夫されている。このがたつきがあるために、正確な主軸スピンドル320の回転角度を回転ステージ331の回転角から知ることができないため、別に回転角度センサ63を設けることにより、主軸スピンドル320の回転角度を直接計測している。また、主軸スピンドル320に加わる外力を小さくする目的で、回転アーム330はできるだけ長く、つまり回転中心からできるだけ遠い位置で回転ステージ331と接触するように工夫している。なぜなら、主軸スピンドル320に等しい回転トルクを与えるにも、小さな力で済むからである。主軸スピンドル320の先端には、アクチュエータ303

(振動手段)が取り付けられており、これからのケーブル333の取り回しが悪いと、主軸スピンドル320が回転する度にケーブルたわみによる変動負荷を受けて、主軸スピンドル320の回転精度を劣化してしまう。そこで、ケーブル59をわざと大きく取り回し、さらにこれを回転ステージ331にケーブルホルダ334で固定している。ケーブルホルダ334とアクチュエータ303の間の相対変位はほとんど無視できるため、回転に伴うケーブル333のたわみ力の影響を除去することが可能である。

【0061】再び図19に戻り、アクチュエータ303、回転主軸304、Z軸ステージ308、Y軸ステー

$$P_m = P_c + T(\theta) r_e + w T(\theta) e_x \quad \dots (1)$$

ただし、 $T(\theta)$ は角度 $\theta$ の回転変換行列で、

【数1】

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

... (2)

ジ309、X軸ステージ310をどのように動かして、微細穴の内面形状を測定するかについて述べる。まず、微細穴の縦断面を測定する場合であるが、回転主軸304を調べたい断面の方向に角度合わせし、この状態でZ軸ステージ308を上方へ送り込みながら、触針301の変位を記録すればよい。触針301は、被測定物306と一定の接触を保つように制御されるが、断面形状が大きく変動する場合はアクチュエータ303の変位範囲を超える場合がある。この時はY軸ステージ309、X軸ステージ310を動かして被測定物を再位置決めして、アクチュエータ303がその変位範囲の中間に戻るようにする。次に、微細穴の真円度測定(横断面測定)であるが、回転主軸304の回転中心を被測定物306の穴中心とほぼ一致させた状態で、触針301を穴側面と接触させ、さらに回転主軸304を360度回転させ、触針301の変位を記録すればよい。真円度測定では、Y軸ステージ309、X軸ステージ310を動かさないために、計測できる穴の最大直径は、アクチュエータ303の変位能力により制限される。また、測定可能な最低の穴直径は、触針301の先端最大径により制限される。回転主軸304と同時にY軸ステージ309とX軸ステージ310を動かせば、任意の大きさの穴を計測できるが、このような機能は以下にのべる任意横断面形状計測で実現される。また、微細穴の円筒度の測定は、以上述べた縦断面測定と横断面測定を組み合わせることにより実現可能である。

【0062】図22は任意横断面形状計測の制御方式を示したものである。図では触針301を上方から眺めているが、触針301の先端の横断面形状は図示のように涙型の形状となっている。これは接触点402を先端の1点に限ることで、常に触針のどの場所が測定対象面401に接触しているかを明らかにするためである。触針301は、図示されないアクチュエータ303により1次元的に変位されるが、その変位量を外側に向かって $w$ とする。回転主軸304の回転中心を $P_c$ とし、また、回転主軸304の回転角 $\theta$ が0の状態における基準方向を表す単位ベクトルを $e_x$ とする。アクチュエータ303の変位方向はこのベクトル $e_x$ に一致されており、また触針301の接触点402の方向もベクトル $e_x$ に一致するように事前に調整されている。回転主軸304の回転角 $\theta$ が0、アクチュエータ303の変位 $w$ が0、のときの接触点402の回転中心 $P_c$ からの位置をベクトル $r_e$ であらわす。以上の条件のもとで接触点402の座標 $P_m$ は次の式であらわされる。

と表されるものである。つまり、 $P_c$  を X 軸ステージ 310、Y 軸ステージ 309 の座標値より知り、また、回転主軸 304 の回転角度  $\theta$  を回転角度センサ 332 から知り、さらにアクチュエータ 303 の変位  $w$  を図 17 の 1 制御器 110 の出力から知れば、接触点 402 の座標  $P_m$  を知ることができる。ここで、問題となるのは、ベクトル  $r_e$  を如何に事前に知るかということであるが、この方法については後で述べる。

【0063】次に、図 23 を用いて任意の形状を持つ測定対象面 401 にたいして触針 301 が如何にして接触

$$P_{m1} = P_m + (v_m t_c) \text{norm} (P_m - P_{m0}) \quad \dots (3)$$

上式において、norm とは与えられたベクトルから単位ベクトルを作る関数とし、また、 $v_m$  は測定速度とする。このようにして求めた  $P_{m1}$  で予測測定対象面 405 に接触するために X 軸ステージ 310、Y 軸ステージ 309、回転主軸 37 を動かす必要があるが、これらの目標値  $P_{c1}$  ならびに  $\theta_1$  は次の式により与えられる。

【数 2】

$$P_{c1} = P_{m1} - \frac{w_{max}}{2} T(\theta_1) e_x - T(\theta_1) r_e \quad \dots (5)$$

上式において、 $w_{max}$  はアクチュエータ 303 の最大変位量を表す。以上の制御方式は予測測定対象面 405 を平面として扱っていたが、当然のことながら予測測定対象面 405 を 2 次以上の曲面と考えて制御を行うことも可能である。しかしながら、制御周期  $T_c$  を十分短くとれば、あるいは計測速度  $v_m$  を遅くすれば、ほとんどの場合平面近似で十分である。

【0064】次に、図 24 と図 25 に、以上の任意横断面形状測定の制御方式で測定できない対象物形状の例を示す。図 24 は測定対象面 406 が 90 度以下のシャープな凹コーナがある場合、図 25 は予測測定対象面 408 が触針の最大径よりも狭い狭隘部がある場合である。両方の場合とも、触針の進行方向 407、409 方向に動きが阻害され、触針が折損するおそれがある。また、図 25 の場合、図 17 に示した制御回路が触針 301 を後退させようとするとかえって触針 301 を折損する結果となる。よって、このような形状を含む可能性がある場合の対策は、まず、図 17 の制御回路は触針 301 の接触状態に異常を検出した瞬間に（異常接触検出信号 214、図 18）、すべてのステージ 308、309、310 および回転主軸 304 の動きを非常停止する機能を持つこと、さらに、計測速度  $v_m$  を十分低速に設定し、異常時に触針 301 にかかる歪みを十分小さくしてやることである。

【0065】次に、図 26 を用いて、図 22 で説明したベクトル  $r_e$  の求め方について説明する。ここでは校正用に正確に仕上げられた半径  $R_{cal}$  の校正用丸穴 410 を使用する。この丸穴 410 の内面を図 23 で説明した

$$X_{im} = (X_{i1} + X_{i2}) / 2$$

点 402 を正しく測定対象面 401 に向けながら追従しつつ測定を行っていくについて述べる。この追従はある制御周期  $t_c$  毎に測定対象面 401 を平面近似して予測測定対象面 405 を作っていくことで実現される。予測測定対象面 405 は平面であるが、実際の測定結果は触針 301 の制御のおかげで任意の測定対象面に追従できる。まず、1 制御周期前の過去の接触点 403 を  $P_{m0}$ 、現在の接触点 402 を  $P_m$  としたとき、次の制御周期の予測接触点  $P_{m1}$  は次の式によって表される。

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} - \text{angle} (P_m - P_{m0}, e_x) \quad \dots (4)$$

上式において、関数 angle は第 1 のベクトルから計った第 2 のベクトルまでの角度をあらわすものとする。

【数 3】

任意横断面形状測定方法により測定を行った時の、主軸中心位置を  $P_{c-real}$  とする。他方、接触点 402 は半径  $R_{cal}$  の円周上にあるという前提から求めた理想の主軸中心位置を  $P_{c-ideal}$  とする。ここに、 $P_{c-ideal}$  と  $P_{c-real}$  の位置ずれ量がベクトル  $r_e$  となる。ここで示したベクトル  $r_e$  を求める校正方式は、触針 301 の先端を正確に回転主軸 37 の回転中心に合わせるための作業にも利用でき、また、測定にともなう触針 301 の磨耗量をモニターする場合にも利用できる。

【0066】次に、図 19 におけるサンプルホルダ 307 に被測定物 306 を設置したときの、測定対象点の探し方について、図 27 を用いて説明する。測定対象点の位置出しは、顕微鏡 314 と TV カメラ 316 を用いて行う。X 軸ガイドレール 311 により顕微鏡 314 の直下に被測定物 306 および XYZ ステージ 308、309、310 が移動される。この状態でフォーカスノブ 315 により顕微鏡 314 の焦点を合わせ、位置出しブロック 335 に設けた 2 つの校正用丸穴 410 をそれぞれ顕微鏡 314 の視野の中心に来るようにステージを動かし、XY 軸ステージ 310、309 の座標を読み、 $(X_{i1}, Y_{i1})$ 、 $(X_{i2}, Y_{i2})$  とする。さらに測定対象点 336 を同様に顕微鏡視野の中心に持ってきて座標  $(X_{is}, Y_{is})$  を読みとる。つぎに、被測定物 306 および XYZ ステージ 310、309、308 を回転主軸 304 の直下に移動し、今度は触針 301 で校正用丸穴 410 を測定することにより、その穴の中心の座標  $(X_{v1}, Y_{v1})$ 、 $(X_{v2}, Y_{v2})$  を読みとる。以上の結果を用いて、測定対象点 336 が存在すると思われる座標  $(X_{vs}, Y_{vs})$  は次の式により求まる。

$$\dots (6)$$

$$Y_{im} = (Y_{i1} + Y_{i2}) / 2 \quad \dots (7)$$

$$X_{vm} = (X_{v1} + X_{v2}) / 2 \quad \dots (8)$$

$$Y_{vm} = (Y_{v1} + Y_{v2}) / 2 \quad \dots (9)$$

【数4】

$$\theta_{YAW} = \tan^{-1} \left( \frac{Y_{v2} - Y_{v1}}{X_{v2} - X_{v1}} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{Y_{i2} - Y_{i1}}{X_{i2} - X_{i1}} \right)$$

... (10)

【数5】

$$\begin{bmatrix} X_{vs} \\ Y_{vs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{YAW} & -\sin \theta_{YAW} \\ \sin \theta_{YAW} & \cos \theta_{YAW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{is} - X_{im} \\ Y_{is} - Y_{im} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{vm} \\ Y_{vm} \end{bmatrix}$$

... (11)

上式においてステージ座標 $(X_{im}, Y_{im})$ 、 $(X_{vm}, Y_{vm})$ は2つの校正用丸穴410の中間点を表す。仮にX軸ガイドレール311の位置決めストッパ312、313による位置決め再現性が極めて高ければ、2座標 $(X_{im}, Y_{im})$ 、 $(X_{vm}, Y_{vm})$ の差は一定となるはずである。しかしながら、現実には、位置決めストッパ312、313の精度は $10\mu\text{m}$ 程度のためばらつきが発生する。また、上式において $\theta_{YAW}$ はX軸ガイドレール311の直進精度のヨーイングによるサンプルホルダ307の回転を表している。以上のような補正式は、X軸ステージ310のストロークが短く、X軸ガイドレール311を採用したために必要になってきたものであり、仮にX軸ステージが回転軸304の直下から顕微鏡314の直下まで移動することが可能であれば、すべて統一されたステージ座標系のもとで取り扱うことができるためこのような補正は必要がなくなる。

【0067】（実施の形態7）次に、本発明の実施の形態7について説明する。本実施の形態7は上記した実施の形態6とほとんど同じであるが、唯一、触針の構造と接触を検出する方式が異なる。そこで、図28を用いて触針の構造を、図29を用いて触針の製作方法を、図30、31を用いて接触を検出する回路のブロック図を、図32を用いて検出信号の発生の様子を説明する。以下に述べていない事柄は実施の形態6と同じなので、実施の形態6で用いた符号をそのまま使用する。まず、接触検出の原理であるが、図28において、触針501の先端が被測定物510に振動の途中で接触すると接触力が発生し、アクチュエータ509、触針501、図19のXYZステージ308、309、310といった力の流れに沿ったあるいは構成部品がこの力を受ける。しかしながら、触針501の微細軸501aの部分（直径 $50\mu\text{m}$ ）がこの全体の力の経路のなかではもっとも弱い部分であるため、この部分がたわむことで接触力を吸収することになる。つまり、微細軸501aのたわみを検出することにより接触力を計測できることになる。今、触針501の先端に接触力による変位 $\delta$ が発生するとき、圧電薄膜502に発生する最大歪みを $\varepsilon_{\text{max}}$ とする

と、 $\varepsilon_{\text{max}}$ は微細軸501aの根元で発生し、その大きさは簡単な材料力学の計算より、

【数6】

$$\varepsilon_{\text{max}} = \frac{3d\delta}{2L^2}$$

... (12)

となる。ただし、 $d$ は微細軸501aの直径とする。つまり微細軸501aの根元付近に圧電薄膜502を形成しておけば、効率的に圧電電圧を集められることになる。仮に、触針501の微細軸501a部分を直径 $50\mu\text{m}$ 、長さ $1000\mu\text{m}$ 、変位 $2\mu\text{m}$ として計算すると、 $\varepsilon_{\text{max}} = 1.5 \times 10^{-4}$ 程度のひずみとなる。この値は微細軸501aの材質である超硬合金の弾性領域内であり、また、圧電薄膜が安定してひずみを検出できる範囲内である。ちなみに、この時の接触力は $92\text{mg}$ となり、これより触針501の測定圧はこれ以下であることがわかる。圧電薄膜502からの出力を金属電極503を通じて外部配線504により取り出し、プリアンプ505を通すと、触針たわみ信号506が得られる。プリアンプ505で注意すべきことは、圧電薄膜502の誘電体容量は極めて小さいことから、今回のような $100\text{Hz}$ といった低周波の信号を検出するために、プリアンプ505の入力インピーダンスはできるだけ高くする必要がある。ちなみに、式(12)を用いた試算では、微細軸501aの慣性力によるたわみは無視した。一般的に、物体のサイズが小さくなると慣性力の影響は小さくなり、表面力やその他の力が支配的となる。今回の微細軸501aを $2\mu\text{m}$ の振幅の正弦波により振動させたときに、慣性力による軸のたわみを試算してみると、 $8.8 \times 10^{-12}\text{m}$ となり全く無視できることがわかる。また、慣性力の影響が小さいことから微細軸501aの一次共振周波数も高くなり数十 $\text{kHz}$ となるため、今回のように $100\text{Hz}$ で駆動する場合はまったく考える必要がない。

【0068】次に、図29を用いて触針501を形成する方法について説明する。圧電薄膜502の製作方法は、参考文献（K.R. Udayakumar, et.al: FERROELECTRI

C THINFILM ULTRASONIC MICROMOTORS, IEEE, 1991)に紹介されているゾルゲル法を用いる。ゾルゲル法は、スパッタ法、蒸着法、CVD法といった他の圧電薄膜製作手法にくらべて極めて製造コストが安く、また、圧電材料の組成変動が少なく安定して圧電薄膜が作れる方法である。また、基板に微細な凹凸がある場合も、これを平滑化する作用があり、今回の用途には最適である。まず、基板となる超硬合金製の微細軸501aは微細放電加工により仕上げられる。はじめに(a)において、レジスト511を塗布した後にフォトリソグラフィをして圧電薄膜をつける場所以外をマスクする。この段階で、仮に微細放電加工条件が最適化されておらず、加工表面のあらさが無視できない場合、電界研磨などの方法で表面あらさを改善する。次に(b)において、密着性を上げるためのTiを20nm程度、さらにPZT形成の下地となるPtを500nm程度蒸着して下地層512を得る。次に(c)において、ゾルゲル液としてPZTメトキシエタノール溶液を用い、この溶液の中に触針501を回転しながらディップすることにより薄く溶液を塗布し、約100nm程度の厚みの膜を得た後、乾燥する。この工程を5回程度繰り返し、最後に焼成することで500nm程度のPZT薄膜513(502)を得ている。PZT薄膜は厚いほど圧電出力が大きくなるが、2μmを越えると微小なひび割れが材料中に発生してしまうので注意が必要である。次に(d)において、Auで金属電極514(503)を500nm程度の厚みで蒸着する。金属電極514は、触針501のたわみ量を知ることが目的であるので、触針501の片側に10~20μmの幅の帯としてフォトリソグラフィの手法をもって形成する。次に(e)において、金属電極514を導電ペースト515および固定接着剤516により外部配線504に接続する。次に、外部配線504と金属電極514により圧電薄膜513に電圧をかけ、分極方向をそろえるためのポーリングを行う。最後に、圧電薄膜513で発生する電圧の大きさを計算する。まず、PZTの発生電圧 $V_{pzt}$ は薄膜厚さ $t_{pzt}$ を用いて次式で表される。

【数7】

$$V_{pzt} = \frac{\epsilon_{max}}{d_{31}} \cdot t_{pzt}$$

・・・(13)

ここに、 $\epsilon_{max}$ は最大ひずみ量で、 $1.5 \times 10^{-4}$ であったこと、ゾルゲル法で形成されたPZT薄膜の圧電定数 $d_{31} = -8.8 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ であること、圧電薄膜の厚さ $t_{pzt} = 500 \text{ nm}$ であることより、 $V_{pzt} = 0.75$ ボルトと計算され、プリアンプ505で十分に測定可能な大きさであることがわかる。実際には、金属電極5

14や導電ペースト515がひずみの小さい部分も覆っているために平均化され、出力はこの値よりも小さくなる。以上の触針の製造方法は超硬合金をベースにしたものであったが、触針をチタンのような材質に変えると、(c)の工程は水熱法で置き換えることも可能である。

【0069】図30は非導電体検出用の接触検出回路507の構成例を示す。触針たわみ信号506がある閾値よりも大きくなれば接触が生じていると見なすことから、コンパレータ602により接触の判定を行い、接触検出信号603を出力する。ただし、圧電体の出力電圧は接触によるひずみ以外にも焦電効果などにより変動してしまうため、これを取り除くために時定数を10秒程度に設定したクランプ回路601によりドリフト成分を除去している。コンパレータ602の設定値としては、触針501が被測定物とまったく接触していないときの触針たわみ信号506のノイズレベルを計測し、ノイズの標準偏差の3倍程度にしてやることが望ましい。

【0070】図31に接触検出回路507の他の構成例を示す。この方式は図30の方式と比べると複雑であるが、触針たわみ信号506以外にアクチュエータ変位信号508も使うため、検出状態の予期せぬ変化(たとえば、被測定物が軟質材料になったなど)に対してもロバストであるという特徴を持つ。この回路は触針たわみ信号506がアクチュエータ変位信号508と比例して変化するときを接触状態と判断し、触針たわみ信号506がアクチュエータ変位信号508の変化にもかかわらず変化しないときを非接触状態と判断する。両者の信号の変化の仕方に相関があるかどうかを判定する部分が相関計算器618である。まず、触針たわみ信号506およびアクチュエータ変位信号508は、それぞれA/D変換器611、614により定期的にデジタル変換され、FIFOメモリ612、616に蓄えられる。FIFOメモリ612、616を用意する理由は、相関計算器618の計算時間が万が一サンプリング周期を越えてしまったときでも、データの欠落が起きないようにするためである。また、両信号506、508に微妙な位相差が生じている可能性があり、これを取り除くためにディレイ615を用意している。両信号のFIFOメモリ612、616に蓄えられた最新の信号データを、相関計算器618は自らのバッファ613、617に取り込み相関演算を開始する。具体的には、触針たわみ信号506とアクチュエータ変位信号508Dの間の回帰係数 $\beta$ を求める。いま、バッファ613、617に取り込まれたデータを $S_i$ 、 $D_i$ 、データ組数を $n$ としたときに、回帰係数 $\beta$ は、

【数8】

$$\beta = \frac{\sum (S_i - \bar{S}) (D_i - \bar{D})}{\sum (D_i - \bar{D})^2} \quad \dots (14)$$

$$\bar{S} = \frac{\sum S_i}{n} \quad \dots (15)$$

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n} \quad \dots (16)$$

と表される。この回帰係数 $\beta$ は、アクチュエータ変位信号 $D$ が変化したときに、どの程度触針たわみ信号 $S$ が変化したかを示すものであるから、触針501が被測定物510に接触したかどうかを知ることができる。いま、触針501が被測定物510にまったく接触していないときに求まる回帰係数 $\beta$ のノイズに起因する変動の標準偏差を $\sigma_B$ とすると、 $\beta$ の正規分布を仮定すれば非接触時の回帰係数 $\beta$ は99.7%の確率で $3\sigma_B$ 以下の値を取るようになる。よって、コンパレータ619によって回帰係数 $\beta$ が $3\sigma_B$ 以上の値をとったら接触というように判断してやればよいことになる。次に、回帰係数 $\beta$ を計算するための計算量について見積もりを行う。データの組数を $n$ とすると、 $\beta$ の計算のためには、式(14)～(16)から、およそ $9n$ 回の加減乗除の演算が必要になってくる。仮に、相関計算に $n=20$ 組のデータを利用するとし、20MIPSのDSPを使用したとすると、一回の相関計算にはおよそ $10\mu S$ が必要となる。また、信号506、508が10kHzでサンプリングされるとすると、データは $100\mu S$ おきに取り込まれることになるので、新しいデータが取り込まれる度に相関演算をすることが可能となり、10kHz置きに新しい相関係数が算出される。以上から、ディレイ615、FIFOメモリ612、616、バッファ613、617、相関計算機618、コンパレータ619の機能をすべて1つのDSP内のソフトウェアで実現することが可能であることがわかる。このため、信号処理装置の構成はきわめて単純となる。最後に、データ組数 $n$ の決定方法であるが、触針ひずみ信号506のノイズレベルや信号変動レベルによって加減することが必要である。一般に、 $n$ が大きくなると接触検出信号620の遅れが目立つようになるが、ノイズには強くなる。

【0071】図32はアクチュエータ変位信号508と触針ひずみ信号506から作り出される非導電体測定物に対する接触検出信号620の様子を模式的に表したものである。触針ひずみ信号 $S$ は接触が始まる瞬間および離れる瞬間に振動的な振る舞いを示すが、ローパスフィルタなどによるフィルタリングや相関計算により取り除いたり、影響を最小限にすることが可能である。以上のようにして得られた接触検出信号620は、図17における導通検出回路107に変わってデューティ計測回路108に入力してやることにより、導体の被測定物を検出する場合とまったく同じように非導電体の被測定物を

検出することが可能となる。

【0072】

【発明の効果】以上のように本発明によれば、触針を振動させるためのアクチュエータの特性を改善するために変位センサを用いたフィードバック制御を実施することで、圧電素子のもつ熱膨張、ヒステリシス、ドリフトといった不都合な特性を取り除くことができる。また、アクチュエータに変位拡大機能を用いたりペンディングモードの圧電素子の変位を使ことにより、触針の変位を大きく設定することで、振動中心の位置を測定表面に追従させることにより従来必要であったX軸駆動機構を不要とし、計測精度の劣化要因を無くし計測速度を高めることができる。さらに、回転主軸、X軸ステージ、Y軸ステージを同時制御することにより、任意の横断面形状の測定が可能になり、従来手動で計測することが必要であった複雑形状も自動的に計測することが可能となった。また、従来は被測定物は電気導電体に限られていたが、触針に圧電薄膜を設けることにより、触針ひずみ量から接触状態を検出することが可能となり、本測定装置が被測定物の材質を選ばない汎用の測定装置になるという有利な効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の実施の形態1～5に用いられる振動ヘッドの一例を示す概略断面斜視図

【図2】本発明の実施の形態1～5に用いられる円筒型PZT素子を示す概略斜視図

【図3】本発明の実施の形態1～5に用いられる振動ヘッドの変位センサの原理図

【図4】本発明の実施の形態1～5に用いられる振動ヘッドの他の例を示す概略断面斜視図

【図5】本発明の実施の形態1～5に用いられる振動ヘッドの他の例を示す概略断面斜視図

【図6】本発明の実施の形態1における微細表面形状測定装置の構成を示すブロック図

【図7】本発明の実施の形態1におけるフィードバック制御の一例を示すブロック図

【図8】本発明の実施の形態2における微細表面形状測定装置の構成を示すブロック図

【図9】本発明の実施の形態3における一般的な導通検出回路例を示す回路図

【図10】本発明の実施の形態3における導通検出回路例を示す回路図

【図 1 1】本発明の実施の形態 4 における導通検出回路を示す回路図

【図 1 2】本発明の実施の形態 5 における微細表面形状測定装置の構成を示す概略図

【図 1 3】本発明の実施の形態 6 における振動手段の一例を示す概略図

【図 1 4】本発明の実施の形態 6 における振動手段の他の例を示す概略図

【図 1 5】本発明の実施の形態 6 における振動手段の他の例を示す概略図

【図 1 6】本発明の実施の形態 6 における振動手段の他の例を示す概略図

【図 1 7】本発明の実施の形態 6 における制御方法の一例を示すブロック図

【図 1 8】本発明の実施の形態 6 におけるデューティ比検出回路の一例を示すブロック図

【図 1 9】本発明の実施の形態 6 における微細表面形状測定装置の構成を示す概略正面図

【図 2 0】本発明の実施の形態 6 における微細表面形状測定装置の回転主軸構成を示す概略正面図

【図 2 1】本発明の実施の形態 6 における微細表面形状測定装置の回転主軸構成を示す概略下面図

【図 2 2】本発明の実施の形態 6 における触針の制御方法の一例を示す模式図

【図 2 3】本発明の実施の形態 6 における触針の制御方法の一例を示す模式図

【図 2 4】本発明の実施の形態 6 における触針の制御制御方式が対応できない場合を示す模式図

【図 2 5】本発明の実施の形態 6 における触針の制御制御方式が対応できない場合を示す模式図

【図 2 6】本発明の実施の形態 6 における触針の取り付け位置を調整する手段を示す原理図

【図 2 7】本発明の実施の形態 6 における顕微鏡による測定対象点の位置出し方法を示す原理図

【図 2 8】本発明の実施の形態 7 における電気電導を使わない触針を用いた振動手段の一例を示す概略図

【図 2 9】本発明の実施の形態 7 における電気電導を使わない触針の製作方法を示す工程図

【図 3 0】本発明の実施の形態 7 における電気電導を使わない接触検出回路の一例を示すブロック図

【図 3 1】本発明の実施の形態 7 における電気電導を使わない接触検出回路の他の例を示すブロック図

【図 3 2】本発明の実施の形態 7 における電気電導を使わない接触検出における信号を表す模式図

【図 3 3】従来の微細表面形状測定装置の構成を示す概略図

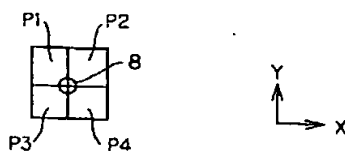
【図 3 4】従来の微細表面形状測定装置の検出方式を示す原理図

【図 3 5】従来の微細表面形状測定装置の検出方式の理論値と実験値を示す特性図

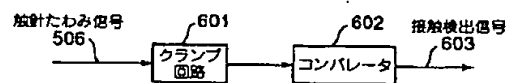
【符号の説明】

- 1 触針
- 2 触針ホルダー
- 3 円筒型 P Z T 素子
- 4 4 分割ホトダイオード
- 5 ピンホールプレート
- 6 LED
- 7 固定板
- 11 微細表面形状測定装置
- 12 振動ヘッド
- 13 駆動回路
- 14 変位センサアンブ
- 15 制御回路
- 16 測定対象物
- 17 導通検出回路
- 18 回転機構
- 19 Z 軸送り機構
- 61、81、91、301、501 触針
- 65、82 圧電素子
- 66 挺子
- 69 差動トランス（変位センサ）
- 78 バイモルフ圧電素子
- 84 送りねじ
- 85 ステッピングモータ
- 93 ボイスコイル
- 104、303、509 アクチュエータ
- 304 回転主軸
- 308 Z 軸ステージ
- 309 Y 軸ステージ
- 310 X 軸ステージ
- 314 顕微鏡
- 316 TVカメラ
- 502 圧電薄膜

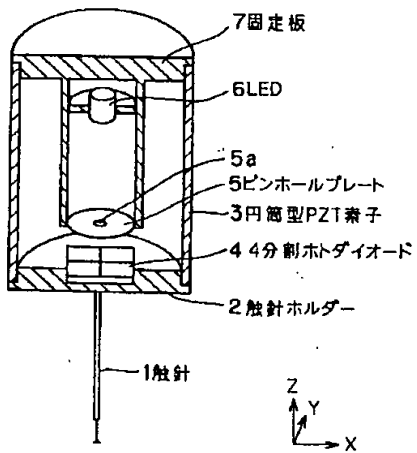
【図 3】



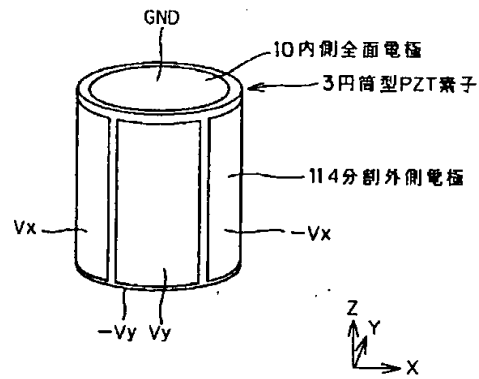
【図 30】



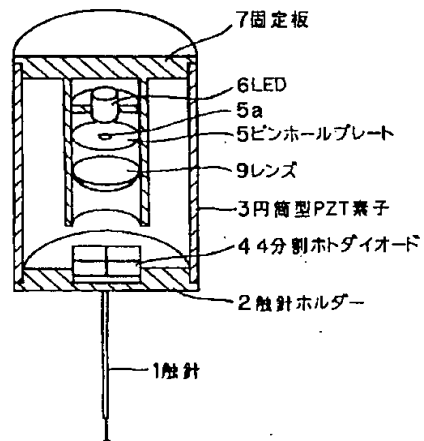
【図1】



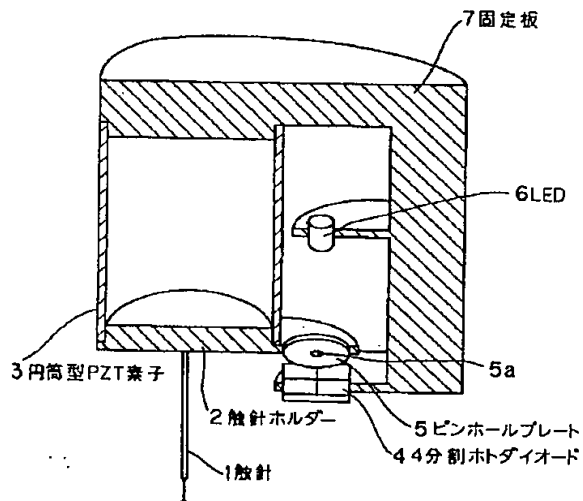
【図2】



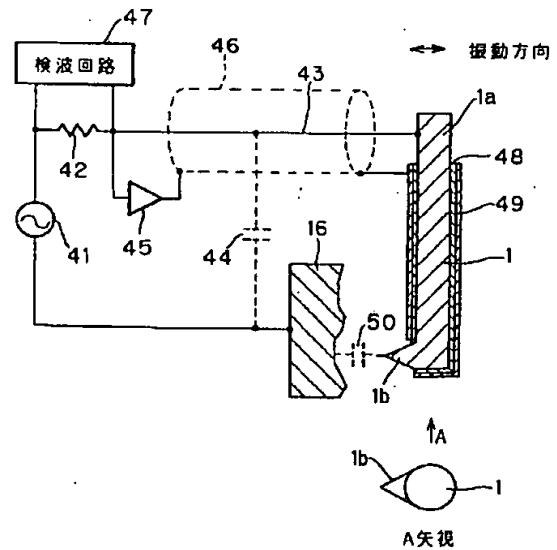
【図5】



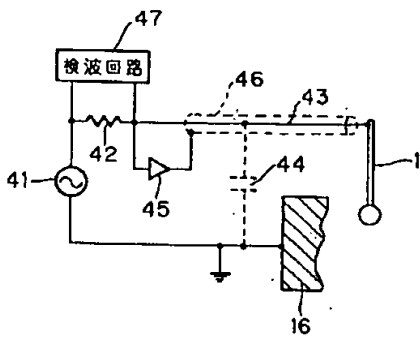
【図4】



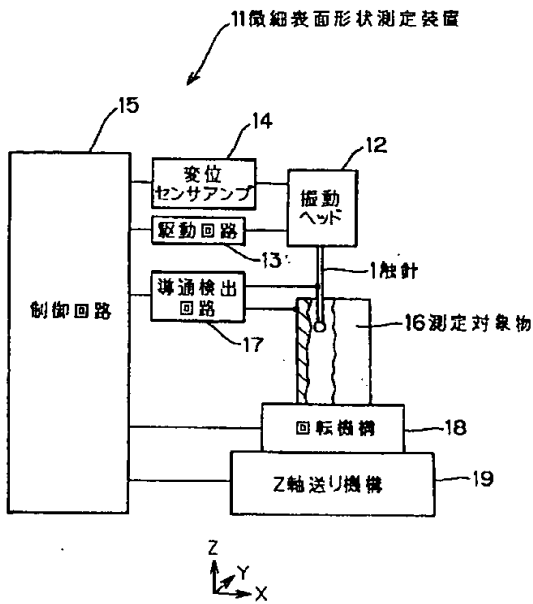
【図11】



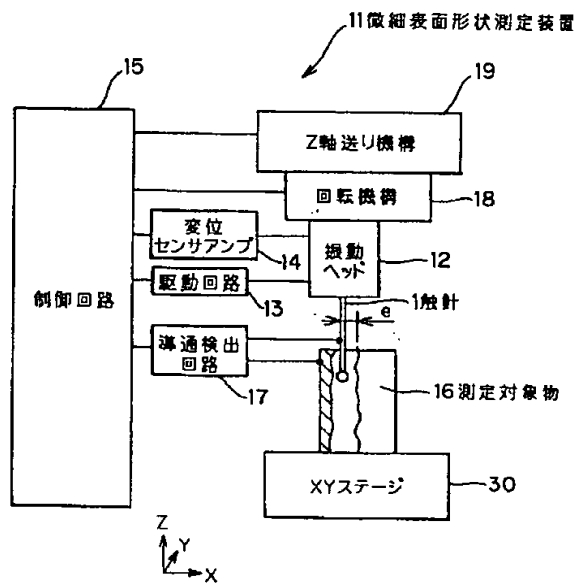
【図10】



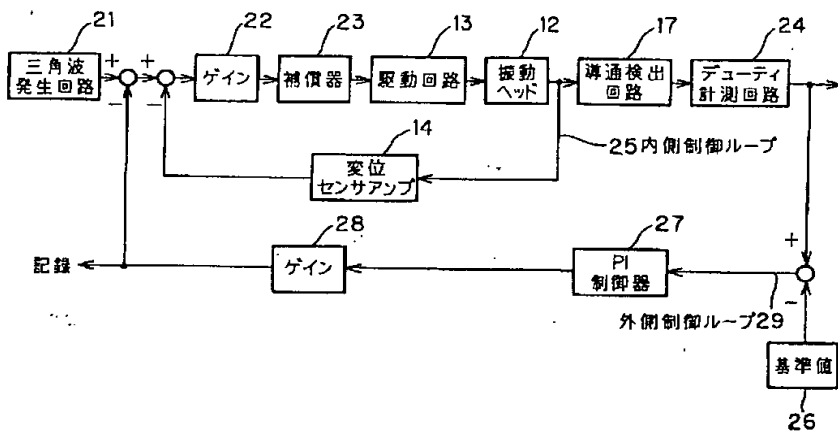
【図6】



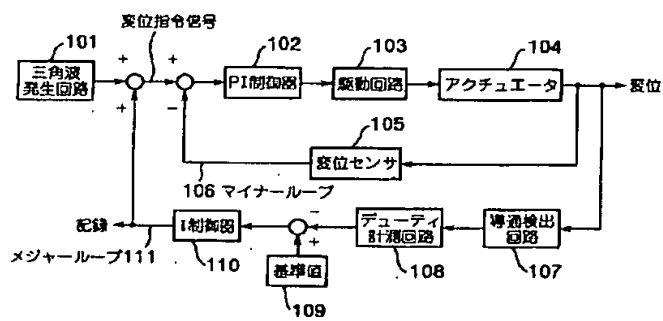
【図8】



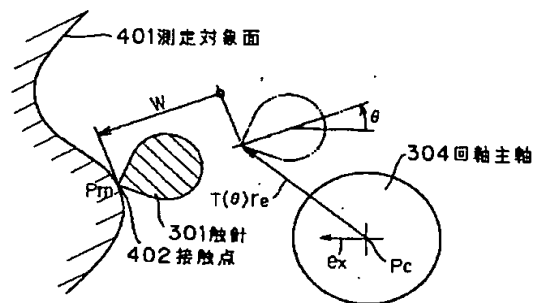
【図7】



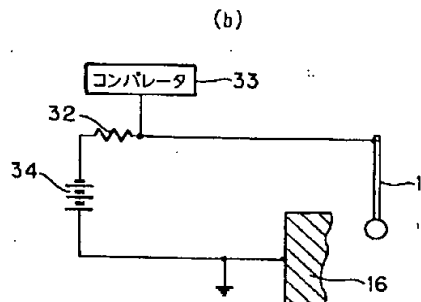
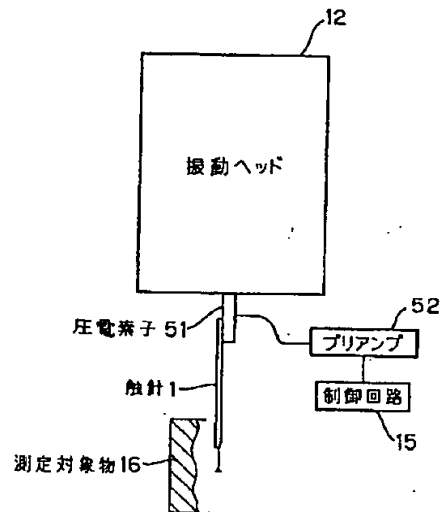
【図17】



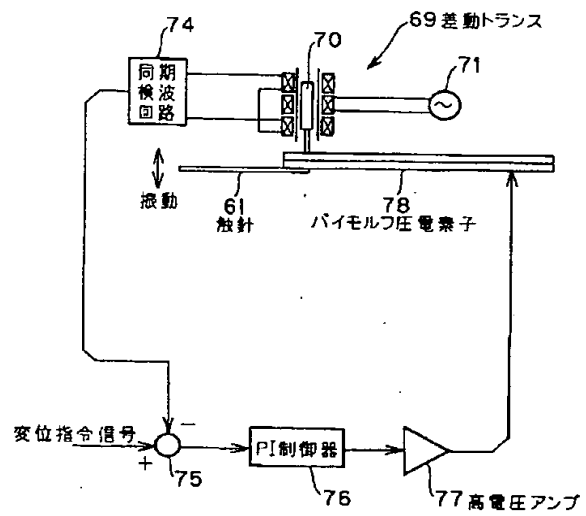
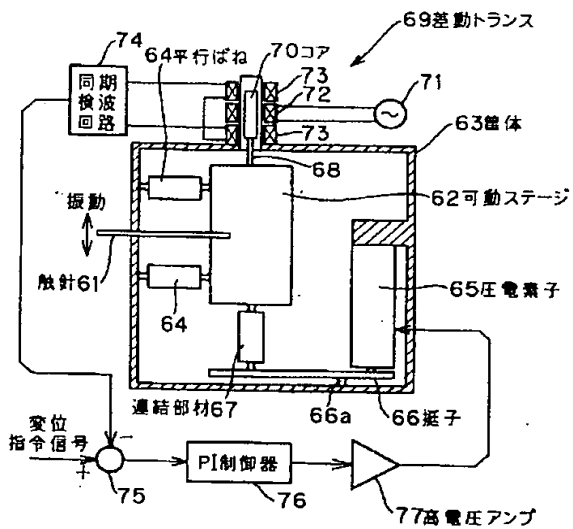
【図22】



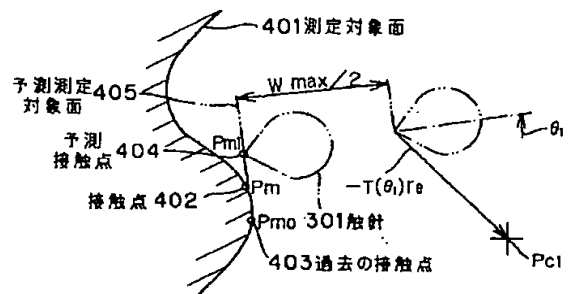
【图 1 2】



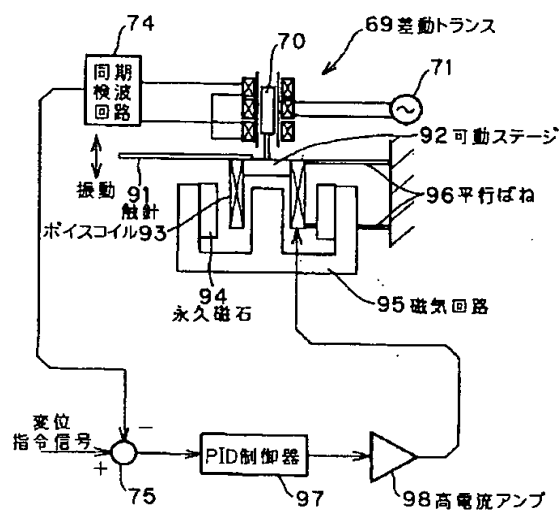
【图 14】



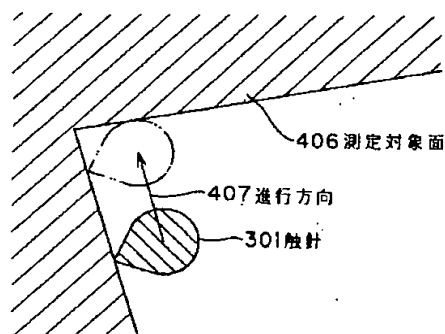
【圖 23】



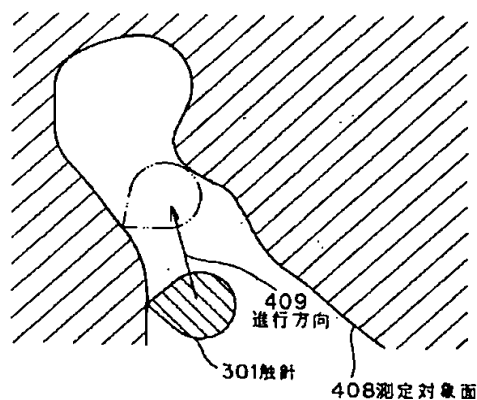
【图 16】



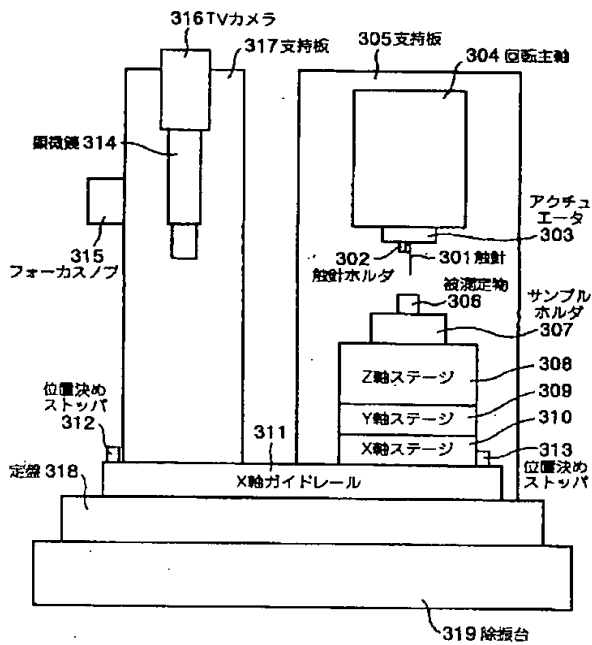
【图 2 4】



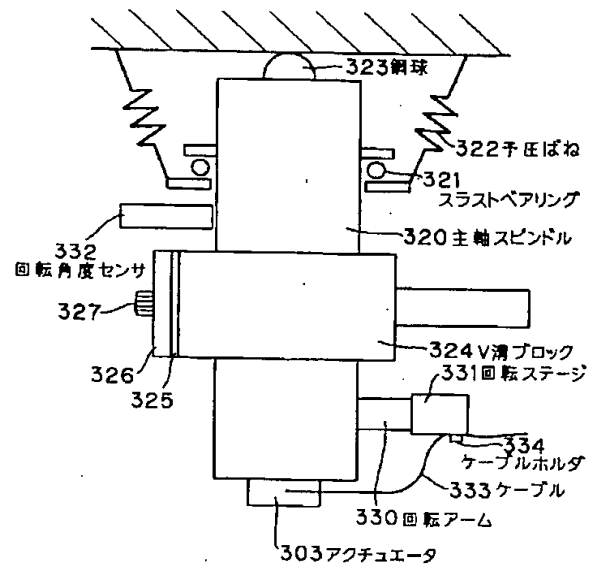
【図 25】



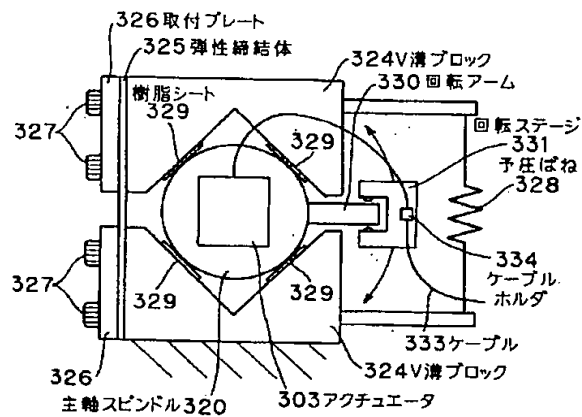
【図 19】



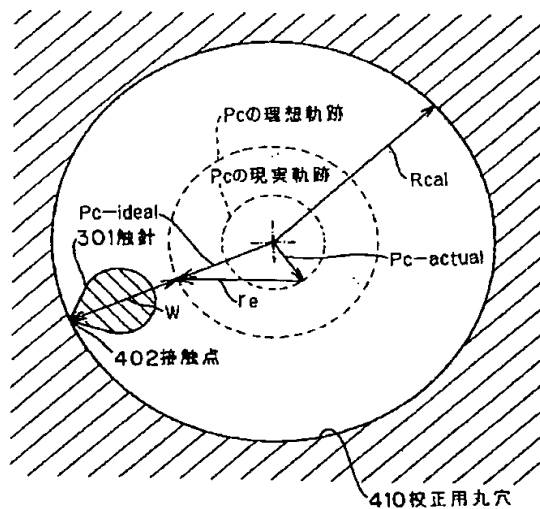
【図 20】



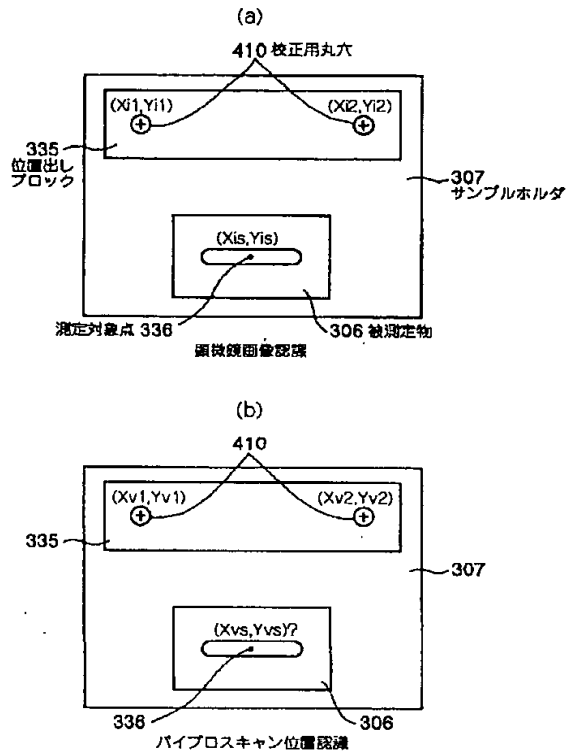
【図 21】



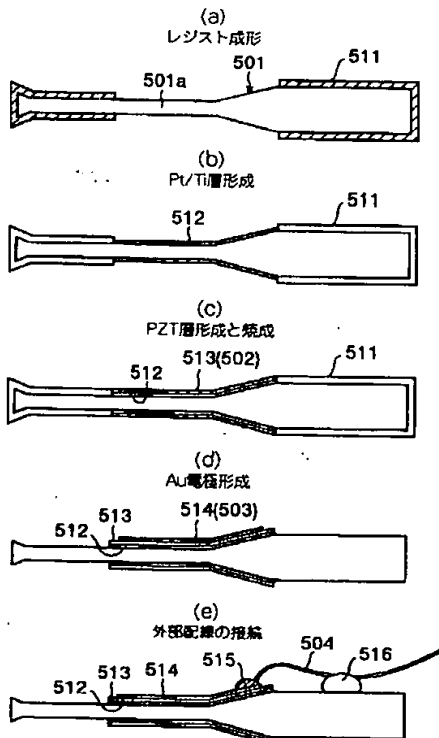
【図 26】



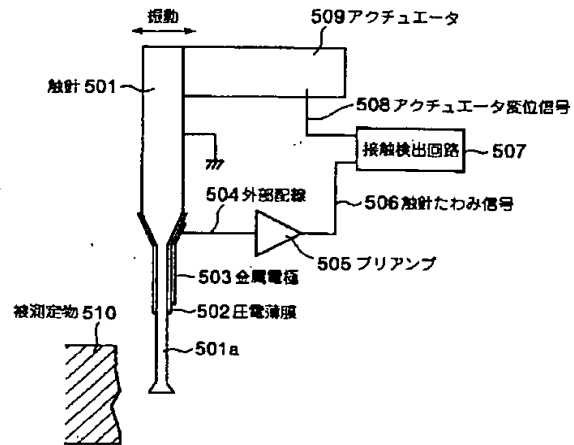
【図 27】



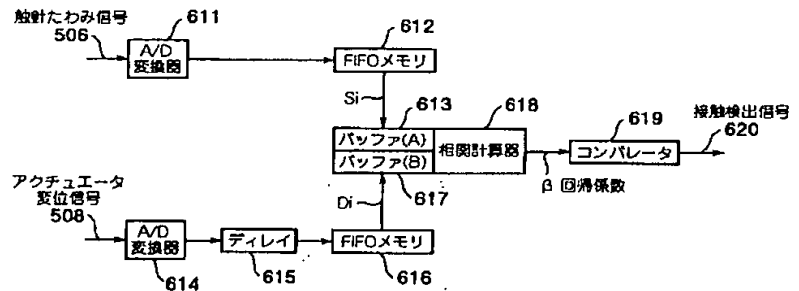
【図 29】



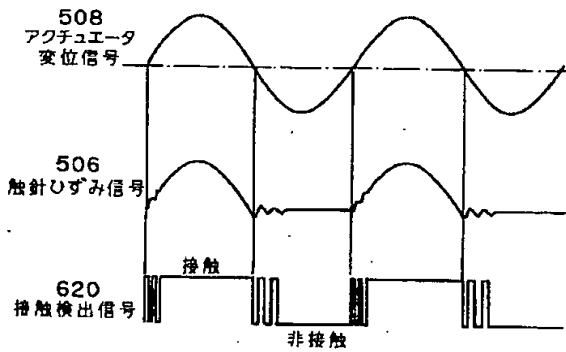
【図 28】



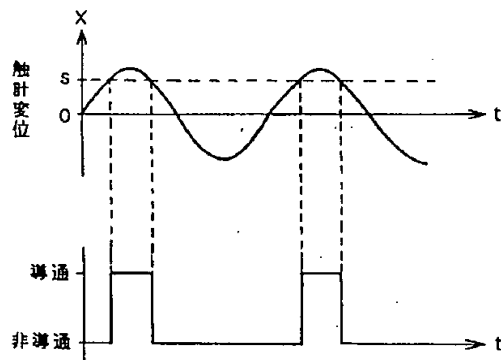
【図 31】



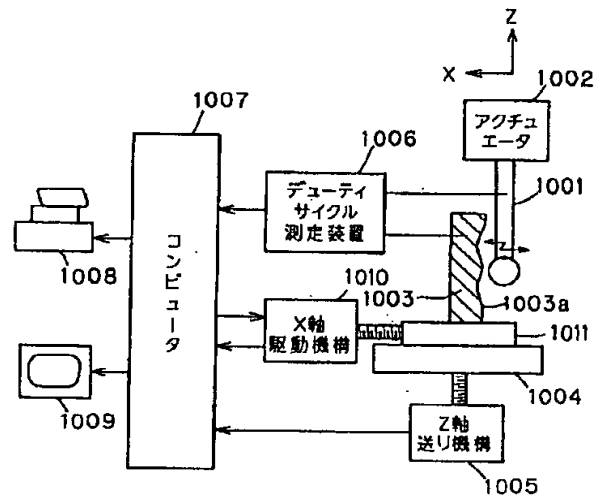
【図 32】



【図 34】



【図 33】



【図 35】

